



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



OPTIMALIZACE VLASTNOSTÍ ZAŘÍZENÍ A NANOVLÁKENNÝCH VRSTEV PRO TVORBU CÉVNÍCH NÁHRAD

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil
Studijní obor: 3107R012 – Technické textilie
Autor práce: **Filip Jedlička**
Vedoucí práce: Ing. Ondřej Novák, Ph.D.

Liberec 2015



TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering ■

OPTIMIZATION OF THE DEVICE PARAMETERS AND NANOFIBER LAYERS FOR PRODUCTION OF VASCULAR GRAFTS

Bachelor thesis

Study programme: B3107 – Textil
Study branch: 3107R012 – Technical textiles
Author: **Filip Jedlička**
Supervisor: Ing. Ondřej Novák, Ph.D.

Liberec 2015

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip Jedlička**
Osobní číslo: **T11000229**
Studijní program: **B3107 Textil**
Studijní obor: **Technické textilie**
Název tématu: **Optimalizace vlastností zařízení a nanovláknenných vrstev pro tvorbu cévních náhrad**
Zadávající katedra: **Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte rešerši na téma "Výroba orientovaných nanovláknenných vrstev".
2. Na zařízení pro výrobu cévních náhrad připravte sérii vzorků, na kterých bude sledována orientace vláken v závislosti na úhlové rychlosti, typu polymeru a dalších vybraných parametrech.
3. Studujte vliv orientace vláken vzhledem k vybraným mechanickým vlastnostem vrstev.
4. Získané výsledky shrňte a pokuste se, bude-li to možné, popsat vhodným empirickým vztahem.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. SHIMIZU, T. Self-Assembled Nanomaterials I: Nanofibers. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-354-0851-035.
2. BHUSHAN, B. Springer handbook of nanotechnology. 2nd rev. New York: Springer, 2007. ISBN 978-354-0298-557.
3. HAGHI, A.K. Electrospinning of nanofibers in textiles. Toronto: Apple Academic Press, 2012. ISBN 978-192-6895-048.
4. BROWN, P.J., STEVENS, K. Nanofibers and nanotechnology in textiles. Cambridge: Woodhead Publishing, in association with The Textile Institute, 2007. ISBN 978-184-5691-059.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondřej Novák, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání bakalářské práce:

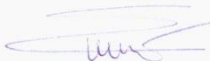
17. října 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

8. ledna 2015


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




prof. RNDr. David Lukáš, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 17. října 2013

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou tvorby orientovaných nanovláknenných vrstev a svazků nanovláken. Nejprve jsou uvedeny různé možnosti výroby nanovláken se zaměřením na elektrostatické zvlákňování a parametry, které tento proces ovlivňují. Dále jsou představeny metody pro získání jednoosově orientovaných nanovláknenných vrstev a svazků nanovláken. V experimentální části jsou stanoveny parametry zařízení pro tvorbu tubulárních prvků. Na zařízení jsou vyráběny vzorky z vybraných polymerních roztoků, při různých otáčkách kolektoru a vzdálenostech jehly od kolektoru. Obrazovou analýzou je sledována orientace nanovláken ve vrstvě. U vybraných vzorků jsou zkoušeny mechanické vlastnosti pomocí tahové zkoušky.

Klíčová slova: nanovláknena, elektrostatické zvlákňování, orientované vrstvy nanovláken

ANNOTATION

This bachelor's thesis deals with the issue of production of aligned nanofiber layers and continuous nanofiber bundles. Firstly, the various options for nanofiber production, focusing on electrospinning and the parameters which influence it, are listed. Next, methods for obtaining uniaxial oriented nanofiber layers and continuous nanofiber bundles are explored. In the experimental part, the parameters of a device for production of the tubular elements are determined. Using the device, samples of selected polymer solutions are produced, varying the speed of the collector and the distance from the needle to the collector. The orientation of the nanofibers in the layer is monitored by image analysis. The mechanical properties of selected samples are determined using tensile tests.

Key words: nanofibers, electrospinning, aligned nanofiber layers

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi během této práce pomáhali a podporovali mě. Nejprve panu Ing. Ondřeji Novákovi Ph.D., vedoucímu této bakalářské práce, za vedení, ochotu, připomínky a čas, který mi věnoval. Dále děkuji zaměstnancům Katedry netkaných textilií a nanovláknenných materiálů, kteří mi vždy pomohli s řešením problémů. Také děkuji své přítelkyni a všem blízkým, kteří mi dodávali psychické podpory, nejen při psaní této práce, ale i po celou dobu studia.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 REŠERŠE	11
1.1 Tažení.....	11
1.2 Fázová separace	12
1.3 Použití šablon	12
1.4 Foukání taveniny.....	13
1.5 Samo – organizování.....	13
1.6 Odstředivé zvlákňování.....	14
1.7 Elektrostatické zvlákňování	14
1.7.1 Metody elektrostatického zvlákňování	15
1.7.2 Parametry ovlivňující proces elektrostatického zvlákňování	20
1.7.3 Jednoose orientované vrstvy a svazky vláken	26
2 VYBRANÉ METODY STUDIA VLASTNOSTÍ NANOVLÁKENNÝCH VRSTEV	37
2.1 Studium orientace vlákenných vrstev	37
2.1.1 Elektronový mikroskop.....	37
2.1.2 Obrazová analýza.....	38
2.2 Mechanické vlastnosti.....	39
2.2.1 Jednoosá deformace	41
2.2.2 Pracovní křivka tahové zkoušky	41
2.2.3 Mechanické vlastnosti stanovené na základě konvenční tahové zkoušky.....	43
2.2.4 Základní typy zkoušek	44
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	46
3.1 Použitá zařízení	46
3.1.1 Zařízení pro získávání tubulárních útvarů z vrstev nanovláken	46
3.1.2 Zdroj vysokého napětí.....	47

3.1.3	Injekční pumpa.....	47
3.2	Použité polymerní roztoky	48
3.2.1	Polyvinylalkohol (PVA)	48
3.2.2	Polykaprolakton (PCL)	48
3.2.3	Polyuretan (PUR).....	49
3.3	Stanovení parametrů zařízení	50
3.3.1	Stanovení otáček kolektoru.....	50
3.3.2	Rychlost posuvu jehly	51
3.3.3	Modální analýza vlastních kmitů kolektoru.....	52
3.4	Orientace vláken.....	54
3.4.1	Výroba vzorků	54
3.4.2	Obrazová analýza.....	55
3.4.3	Měření orientace	55
3.5	Mechanické vlastnosti	59
3.5.1	Výroba vzorků	59
3.5.2	Příprava vzorků pro tahovou zkoušku	60
3.5.3	Pevnostní zkouška.....	61
3.5.4	Vyhodnocení	61
4	Diskuze výsledků.....	68
	ZÁVĚR.....	73
	LITERATURA	75
	PŘÍLOHY	78

ÚVOD

Prvotní objev výroby nanovláken umožnil vývoj technologií v mnoha směrech. V současné době jsou nanovlákná součástí mnoha oborů s nejrůznějšími možnostmi využití, zejména pro jejich vlastnosti, jako velký měrný povrch nebo poměr délky nanovlákná a průměru. Právě tyto vlastnosti nanovláken vedou k nejrůznějším použitím, jako jsou vysoce účinné filtry, vlákna vyztužené kompozity, textilie pro krytí ran či léky uvolňující materiály, atd. [1].

Zaměříme-li se na elektrostatické zvlákňování, zjistíme, že je zde celá řada možností nastavení procesu a okolností, které proces elektrostatického zvlákňování ovlivňují. Z tohoto důvodu vznikají nejrůznější struktury a uspořádání nanovláknenných vrstev, které ve většině případů vykazují izotropní charakter.

Pro některé z výše uvedených aplikací je snaha vlákna zarovnat a vytvořit tak orientovanou vrstvu. Byla vytvořena celá řada metod pro získání orientovaných vrstev nebo svazků jednoose orientovaných nanovláken, které otevřely cestu pro další zajímavé aplikace. Například tvorba prostorových nosičů pro tkáňové inženýrství s orientovanými vlákny podél směru působících sil, které jsou obvykle přítomny v dynamických prostředích tkání, jako šlach a svalů, povede k významnému zlepšení výkonnosti. Také kompozitní materiály vyztužené orientovanými nanovlákná vykazují vyšší odolnost [1].

Cílem této práce je uvést do problematiky tvorby orientovaných vrstev, např. svazků nanovláken nebo vrstev s převládajícím uložením vláken v jednom směru. V experimentální části je řešena snaha nalézt optimální nastavení přístroje pro tvorbu tubulárních prvků (například cévních náhrad). Nejprve byly stanoveny základní parametry přístroje, jako je rychlost posuvu jehly či otáčky hřídele, která slouží jako kolektor. Dále byl zkoumán vliv různého počtu otáček na orientaci nanovláken ve vrstvě při dvou vybraných vzdálenostech hrotu zvlákňovací jehly od kolektoru. Pro tvorbu vrstev byly zvoleny tři odlišné polymerní roztoky, konkrétně polyvinylalkohol, polykaprolakton a polyuretan. Vytvořené vzorky byly podrobeny obrazové analýze.

Následně byly zkoumány mechanické vlastnosti u vzorků vyrobených z polykaprolaktonu a polyuretanu. Zvoleny byly tři různé hodnoty otáček, při dvou odlišných vzdálenostech hrotu jehly od kolektoru. Vzorky byly podrobeny tahové zkoušce na trhačím zařízení.

Cílem této bakalářské práce je tedy zjistit optimální nastavení přístroje pro získání orientovaného vzorku s co nejlepšími mechanickými vlastnostmi.

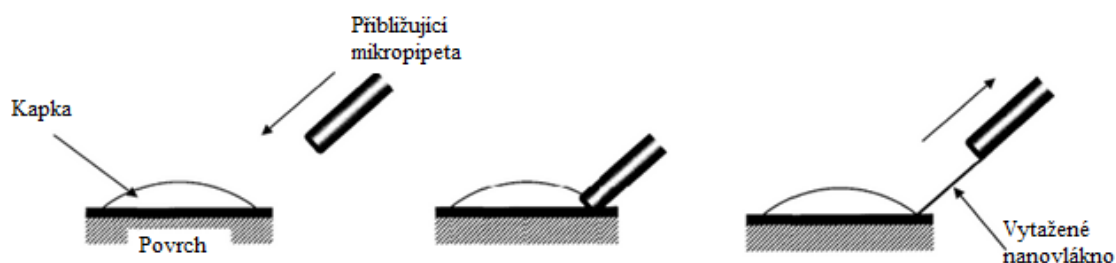
1 REŠERŠE

Tato část práce je zaměřena na možnosti přípravy nanovláknenných vrstev různými způsoby. Podrobněji pak seznamuje s možnostmi příprav útvarů s řízenou orientací struktury.

Termín „nano“ pochází ze slova řeckého původu „nanos“, což znamená trpaslík. Před rozvojem nanotechnologií, byla předpona „nano“ často používána nesprávně. Běžně se například používá termín nanoplankton, ačkoliv je jeho velikost 2-20 μm . Nanovláknna jsou vlákna, kde délka výrazně převyšuje průměr, ten se pohybuje v rozmezí 50 – 500 nm. Někdy se udává průměr do 1000 nm, taková vlákna jsou často klasifikována jako submikronová. Mezi významné vlastnosti nanovláken patří velký měrný povrch, vysoká porozita a malá velikost pórů [2, 3]. Nanovláknna lze vyrábět řadou postupů. Ne všechny se však hodí pro průmyslovou výrobu.

1.1 Tažení

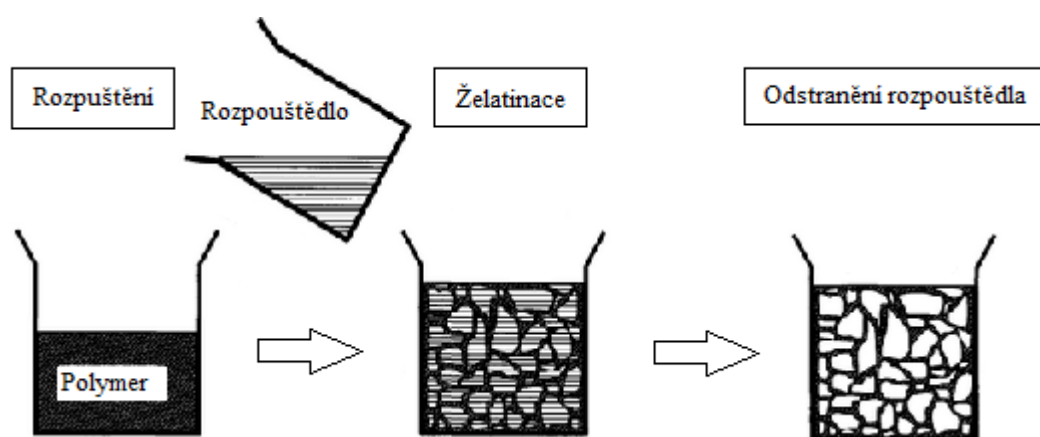
Mikropipeta o průměru několika mikrometrů je ponořena do kapky v blízkosti kontaktní roviny. Poté je mikropipeta odtahována určitou rychlostí (obvykle 10^{-4} m.s^{-1}). Mezi kapkou a mikropipetou vzniká vlákno, které za vhodných podmínek může dosáhnout submikronových tlouštěk. Schematicky je daný postup zobrazen na obr. 1. Nevýhodou je diskontinuální proces a nereprodukovatelnost tlouštěk vzniklých vláken, proto se nezdá tato metoda vhodnou tvorbou pro větší výrobu [2, 4].



Obr. 1 Schéma výroby nanovláken tažením [2]

1.2 Fázová separace

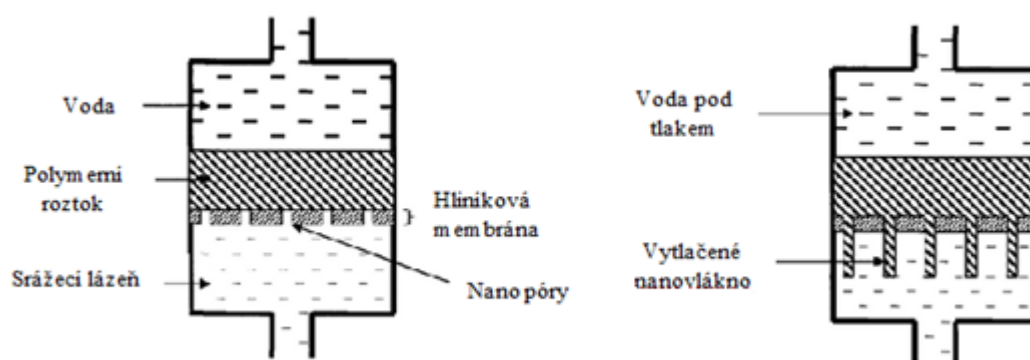
Hlavním mechanismem procesu je oddělení fází v důsledku fyzikální neslučitelnosti. Postup je zobrazen na obrázku 2. Homogenní fáze je ochlazená na teplotu, kdy dojde ke zgelování. Následně je původní rozpouštědlo ze struktury gelu nahrazeno rozpouštědlem jiných vlastností. Je vytvořena vláknitá nanoporézní struktura v původním gelu. Poté je materiál ochlazen na teplotu tuhnutí druhého rozpouštědla, které se za sníženého tlaku odstraní sublimací. Vzniká objemný útvar s nanovláknennou vnitřní strukturou. Metodu lze využívat pouze pro určité polymery. [2, 4]



Obr. 2 Schéma výroby nanovláken fázovou separací [2]

1.3 Použití šablon

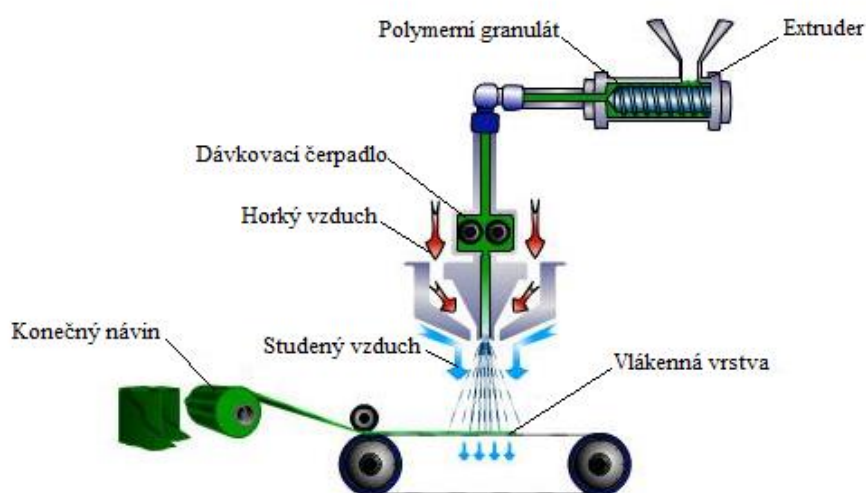
Pro získání požadované materiálové struktury se používá šablon nebo forem s velmi malými otvory. Na 3. obrázku vidíme, že tlakem vody na jedné straně je protlačován polymer, který ve styku se srážecí lázní vytváří nanovlákná o průměrech i několika nanometrů [2, 4].



Obr. 3 Schéma výroby nanovláken použitím šablon [2]

1.4 Foukání taveniny

Jedná se o velmi nadějnou metodu přípravy nanovláken, jejíž schéma je zobrazeno na obrázku 4. Dnes téměř výhradně slouží k výrobě mikrovláken o průměrech 2-7 μm . Tavenina polymeru je přiváděna do trysky s mnoha otvory, ke kterým je současně veden ohřátý a stlačený vzduch. Po vytlačení taveniny z otvorů dochází k zachycení vzduchem, unášení a dloužení. Vzniklá vlákna jsou ovlivněna různými parametry zařízení (např. tvar a rozmístění trysek), vlastnostmi taveniny (např. teplota tání, index toku) a parametry proudícího vzduchu (např. charakter proudění, teplotní gradient). Touto metodou lze získat plošné i objemové vláknenné útvary [4].



Obr. 4 Schéma výroby nanovláken foukáním taveniny [5]

Vlákna také mohou být vyráběny jako dvousložkový systém, standardně procesem zvláknění a dloužení. Nanovlákna („ostrovy“) z polypropylenu, polyetylentereftalátu a polyamidu 6 jsou obklopeny rozpustným polymerem etylenvinylalkoholem („mořem“). Rozpuštěním polymeru dojde k oddělení jednotlivých vláken. Poměr ostrovů a moře byl 50/50. Výsledná vlákna mají poměrně malé průměry vláken, přibližně 300 nm. Rychlost produkce byla až 5 kg za hodiny. Na rozdíl od elektrostatického zvláknění a foukání taveniny vzniká užší rozsah průměrů [6].

1.5 Samo – organizování

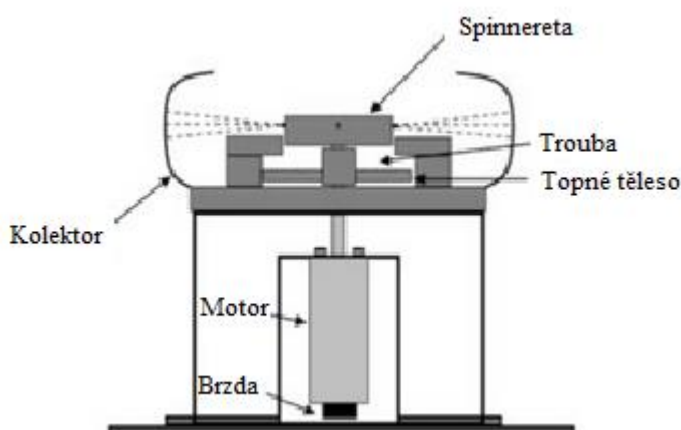
Obecně, ke vzniku nanovláken dochází organizací menších molekul jako základních stavebních struktur [2].

1.6 Odstředivé zvlákňování

Metoda odstředivého zvlákňování, kterou lze získávat vláknenné struktury s vysokou orientací, dosahuje v poslední době značný vliv k tvorbě nanovláken. Velkou výhodou může být úspora energií, protože zde není potřeba žádné tepelné vyhřívání trysky, jako je tomu u technologie meltblown. Další výhodou je používání méně nebo dokonce žádného rozpouštědla. Zvlákňovaná kapalina navíc nemusí být vodivá. Dále ji lze použít na některé biopolymery, které nejsou přístupny vysokému napětí, jako u elektrostatického zvlákňování.

Do zásobníku zvlákňovací spinnerety se dávkuje polymerní roztok nebo tavenina. Otvory na vnější straně nádrže dochází otáčením spinnerety k tvorbě vláken vlivem odstředivých sil. Vlákna jsou dále zachycována na kolektor.

Na obrázku 5 je schéma zařízení pro odstředivé zvlákňování. U zvlákňování z taveniny je použito topného tělesa k tavení polymeru [7].



Obr. 5 Schéma výroby nanovláken odstředivým zvlákňováním [7]

1.7 Elektrostatické zvlákňování

Patří k nejrozšířenějšímu způsobu získávání nanovláken. Elektrostatickému zvlákňování bude věnována samostatná kapitola, kde budou popsány parametry, které tento proces ovlivňují a různé způsoby a možnosti tohoto zvlákňování. Proces elektrostatického zvlákňování byl patentován v roce 1934 Anonem Formhalsem, který k výrobě polymerních vláken použil elektrostatické síly [2].

Dnes se z pohledu masové kontinuální výroby nanovláken řadí mezi jednu z nejpoužívanějších metod. Doposud bylo touto metodou zvlákňováno více než padesát polymerů do velmi jemných vláken v rozmezích 3 nm – 1 μ m. Rozpouštění polymeru se většinou provádí při pokojové teplotě v atmosférickém tlaku.

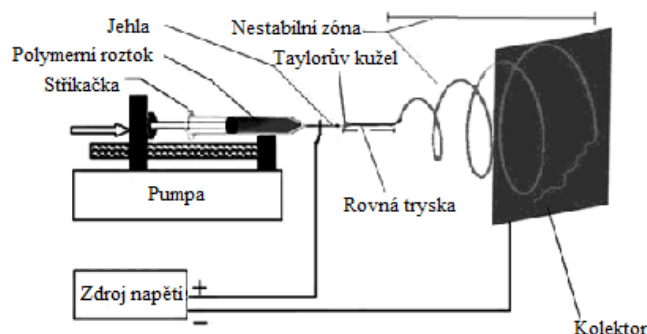
Polymerní roztok či tavenina je elektricky nabíjena proudem vysokého napětí. Elektrickému poli je takto vystaven konec kapiláry, která obsahuje roztok polymeru držený svým povrchovým napětím. Náboj je indukován na povrchu polymeru. Vzájemné odpuzování nábojů a kontrakce povrchových nábojů k proti elektrodě (kolektoru) způsobí sílu opačnou povrchovému napětí. Díky vysokému elektrickému napětí mezi špičkou kapiláry a uzemněným kolektorem vzniká tzv. Taylorův kužel na špičce kapiláry (vzrůstající intenzitou elektrického pole se prodlužuje hemisférický povrch kapaliny). Dalším zvyšováním elektrického pole dojde k překonání kritické hodnoty, odpudivá elektrostatická síla překová povrchové napětí a ze špičky Taylorova kužele vychází proud nabitého polymeru. Tento proud projde nestabilitou a dloužením, stane se tedy dlouhým a tenkým. Po odpaření rozpouštědla vzniká nabitě vlákno. Pokud je použito taveniny, proud ztuhne při dráze ve vzduchu [8].

1.7.1 Metody elektrostatického zvlákňování

Dále jsou popsány různé metody elektrostatické zvlákňování. Můžeme je dělit dle zvlákňující elektrody na zvlákňování kapilární (z jehly), zvlákňování koaxiální a zvlákňování bez jehly, někdy zvané zvlákňování z volné hladiny. Všechny zmíněné budou popsány níže.

Kapilární zvlákňování

Je použita tenká kovová kapilára s vysokým negativním nebo pozitivním potenciálem, kterou je ke špičce dodávána vodivá kapalina (obrázek 6). Vlivem vysokého elektrického napětí se náboj hromadí na povrchu kapky a vytváří se nestabilita, která polokulovou kapku deformuje do tvaru kužele, zvaného jako Taylorův kužel. Nevýhodou je nízká produkce systémů a možnost zanesení kapiláry. Byly vytvořeny metody více jehlového systému, který umožňuje zvýšení produkce a výrobu vícesložkových nanovlákných vrstev [9, 10].

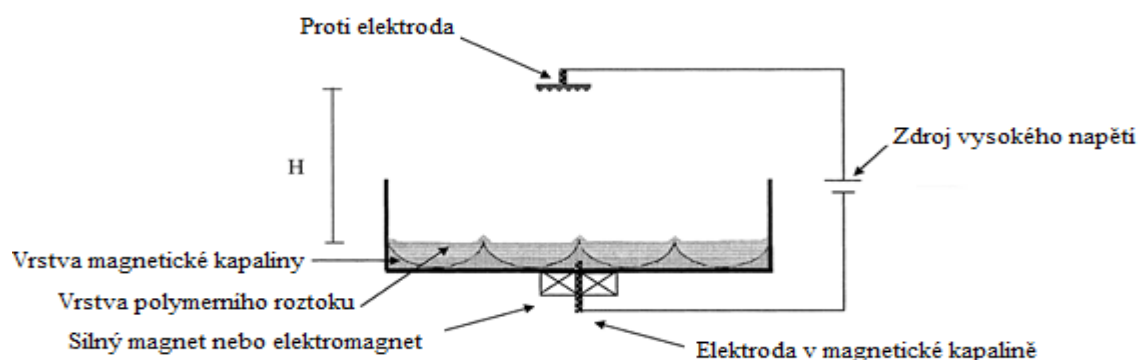


Obr. 6 Schéma jehlového elektrostatického zvlákňování [11]

Zvlákňování z volné hladiny

Bezkapilárové zvlákňování, někdy nazývané zvlákňování z volné hladiny, odstraňuje problémy s ucpáváním kapilár. Tento způsob zvlákňování se může dělit podle toho, zda je elektroda stacionární či rotující.

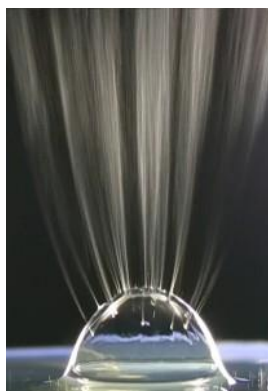
Yarin a Zussman vytvořili dvouvrstvý systém, jak ukazuje obrázek 7, kde pomocí magnetického pole vznikají ostré kuželovité hroty, stojící vertikálně na mělké vrstvě magnetické kapaliny. Spodní vrstvou je magnetická kapalina, připravena smícháním magnetického prášku v petroleji s kyselinou olejovou jako stabilizátorem. Vrchní vrstvu vytváří polymer [12].



Obr. 7 Schéma zvlákňování z volné hladiny pomocí magnetické kapaliny [12]

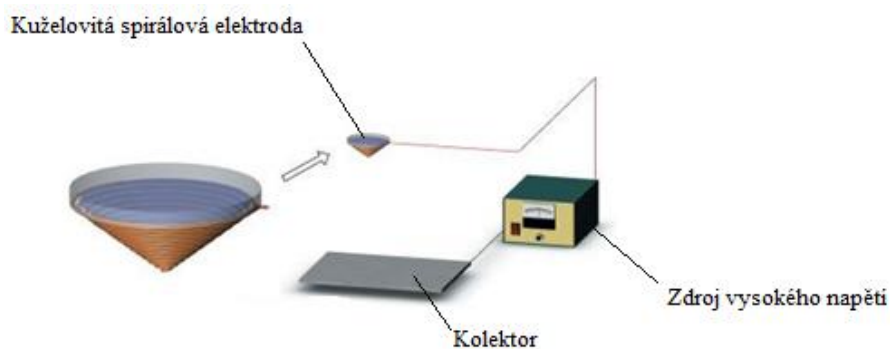
Dalším zajímavým způsobem je foukání plynu do polymeru za účelem vzniku bublin. Bubliny na povrchu polymeru mají částečně kulovitý nebo kuželovitý tvar, který se podobá Taylorovu kuželu v tradičním elektrostatickém zvlákňování. Roztok je nabíjen silným elektrickým polem a pokud je hodnota napětí vyšší než prahová, vznikají trysky (obrázek 8).

Počet těchto trysek závisí na velikosti a počtu bublin a na aplikovaném napětí [13].



Obr. 8 Pohled na bublinu vytvořenou pomocí foukání plynu do polymeru [14]

U obou předcházejících metod jsou vlákna zvláknována vzhůru. Následující způsob má konfiguraci opačnou. Zvláknování pomocí kuželovité spirály (obrázek 9) probíhá směrem dolů a řeší se tak problém s dodáváním polymerního roztoku. Drátěná spirála tvoří nádobu pro polymer, na vnějším povrchu kužele je větší elektrický potenciál, což umožňuje zvláknování právě z tohoto povrchu na kolektor. Na obrázku 10 vidíme, že polymer se vlivem vysokého elektrického napětí přivedeného na drátěný kužel posouvá mezi mezery drátů, které jsou 1mm široké [15].

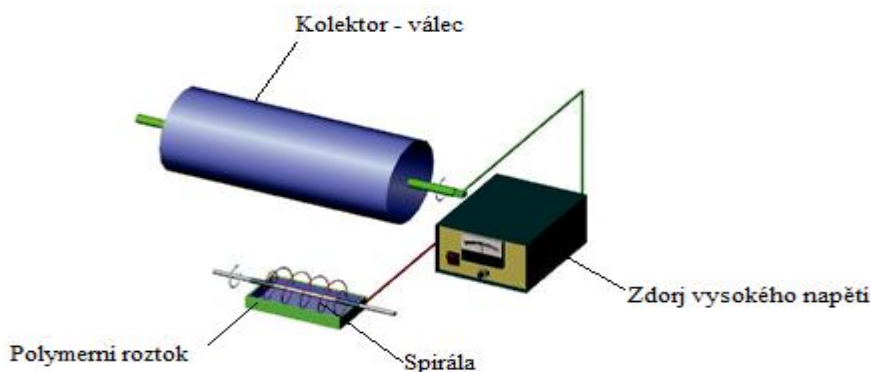


Obr. 9 Schéma elektrostatického zvláknování pomocí drátěné spirály [15]



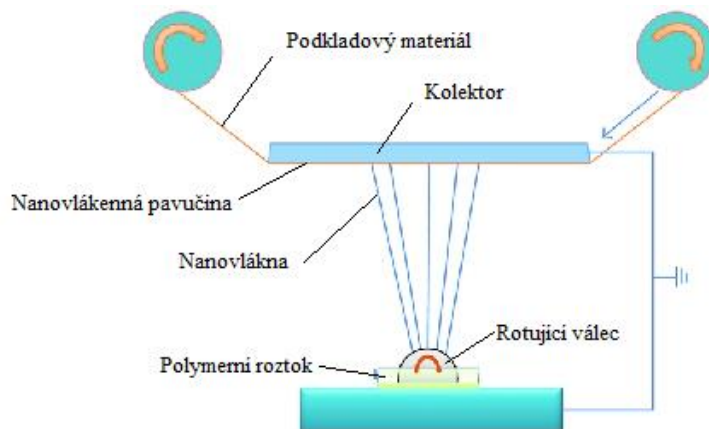
Obr. 10 Detail mezery mezi drátěnou spirálou [15]

Všechny výše uvedené metody spadají do skupiny stacionárních elektrod. Bylo vytvořeno i mnoho metod, kde je zvlákňováno z různých typů pohyblivých elektrod. Jednou z nich může být měděná spirála (obrázek 11). Roztok polymeru je na povrch cívky dávkován jejím otáčením (40 ot.m^{-1}). Zdroj vysokého napětí je přiveden na spirálu, tím dochází k nabíjení polymeru a zvlákňování. Vlákná jsou zachytávána na rotující válec pokrytý hliníkovou fólií [16].



Obr. 11 Schéma elektrostatického zvlákňování pomocí otočné spirály [16]

Nejzásadnější rozvoj zvlákňování z volné hladiny však přišel s vynálezem systému NanospiderTM (obrázek 12), vyvinutým Technickou univerzitou v Liberci a vyráběným českou společností Elmarco. Váleček je částečně ponořen v polymerním roztoku. Roztok je otáčením válečku vynesena na svůj povrch, kde v horní úvrati (nejmenší vzdálenost od kolektoru) vlivem maximální intenzity elektrického pole vznikají Taylorovy kužely, které vyústí v proces zvlákňování. Čím je vyšší počet zvlákňovacích míst, tím je vyšší i produktivita. Polymer je zachycován na kolektoru ve formě netkané textilie [17].



Obr. 12 Schéma Nanospideru [18]

Koaxiální zvlákňování

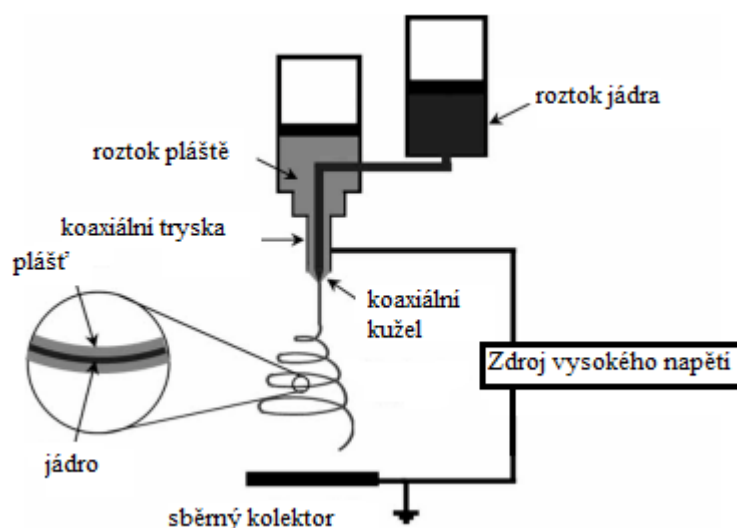
Jedna z nejdůležitějších technik elektrostatického zvlákňování pro výrobu nanovláken s dutou strukturou nebo strukturou jádro-plášť je zvlákňování koaxiální (obrázek 14). V procesu dva různé polymery protékají koaxiální kapilárou, která je tvořena ze dvou kapilár umístěných v sobě. Takto vzniká struktura, kde jeden materiál je obklopen materiálem druhým. Tato metoda může umožnit širokou škálu požití:

- Izolace nestabilní složky
- Možnost uvolňování látek v čase na určitý receptor
- Posílení materiálu ke zlepšení mechanických vlastností
- Lešení pro tkáňové inženýrství (méně biokompatibilní materiál obklopen více biologicky kompatibilním materiálem)

Z obrázku 13 je patrné, že proces zvlákňování koaxiálního je analogický s kapilárním zvlákňováním. Napětí vznikající v roztoku pláště způsobuje vytahování jádra vlivem kontaktního tření mezi kapalinami. Sloučená souosá tryska se vytvoří na špičce kužele, a pokud je kužel stabilní, jádro je rovnoměrně začleněno do pláště. [19]



Obr. 13 Detail vzniku vlákna jádro-plášť [19]



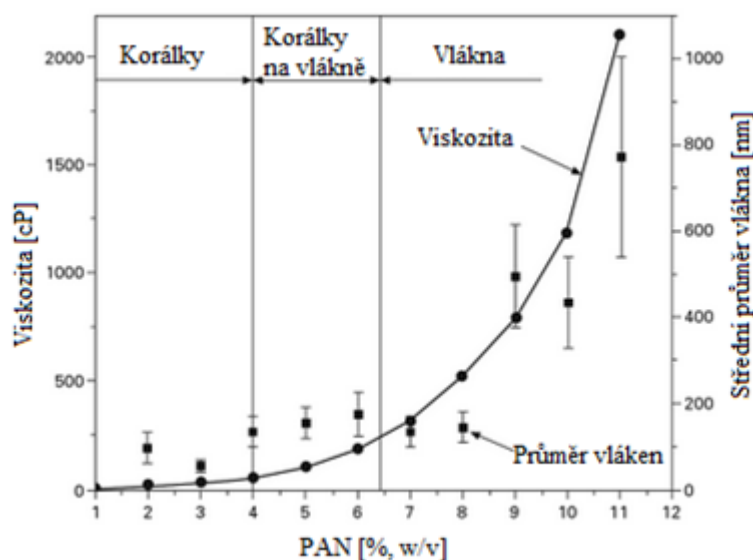
Obr. 14 Schéma koaxiálního zvlákňování [19]

1.7.2 Parametry ovlivňující proces elektrostatického zvlákňování

Přeměnu polymerního roztoku do nanovláken může ovlivnit řada parametrů. Parametry zahrnují vlastnosti roztoku, jako je viskozita, vodivost a povrchové napětí. Dále procesní podmínky jako je napětí, dávkování polymeru či vzdálenost mezi hrotem a sběrným kolektorem. V neposlední řadě pak okolní podmínky procesu, jako je teplota, vlhkost a rychlost proudění vzduchu v elektrostatické komoře [8].

1.7.2.1 Parametry roztoku

Koncentrace polymeru mohou být rozsáhle využívány pro změnu vlákně morfolgie při elektrostatickém zvlákňování. Byla snaha porozumět vlivu koncentrace na další vlastnosti roztoků, jako je viskozita, povrchové napětí a vodivost. V rámci stejných podmínek elektrostatického zvlákňování zvyšuje koncentrace polymeru průměr vláken. Tento vztah je nelineární a můžeme ho přičíst nelineárnímu vztahu mezi koncentrací polymeru a viskozitou roztoku. Z grafu 1 vyplývá, že pokud je koncentrace polymeru nízká, zvyšuje se viskozita roztoku mírně. Se vzrůstající koncentrací polymeru se viskozita postupně zvyšuje, dokud koncentrace nedosáhne určité hodnoty, kdy se viskozita zvýší značně.



Graf 1 Vliv koncentrace polymeru na viskozitu [1]

Při procesu elektrostatického zvlákňování se rozpouštědlo odpařuje nepřetržitě z proudu vláken, dokud nedojde k vysušení. Protahováním vlákněného proudu se

zvětšuje plocha, která urychluje odpařování. Proces od počátku zvláknění po vysušení je velmi rychlý, mluvíme řádově o desítkách milisekund. V případě, že síla k protažení zůstane stejná, zvláknit roztok polymeru o vyšší viskozitě může být těžší. Na druhou stranu koncentrace polymeru ovlivňuje vodivost roztoku, která má vliv na hustotu náboje. Protažení se zvyšuje v důsledku zvýšené hustoty náboje. To může do určité míry kompenzovat obtížně dloužitelné roztoky o vyšší koncentraci polymeru. V některých případech je síla zlepšena do té míry, že neutralizuje účinek viskozity, což má za následek příbuzný lineární vztah mezi koncentrací a průměrem vlákna. Snížení koncentrace polymeru je jednoduchou cestou k výrobě jemnějších nanovláken.

Elektrostatické zvláknování zředěného roztoku obvykle vede ke vzniku koloidních perliček nebo korálků na vlákne (někdy zvané náhrdelníkový efekt). Elektrostatické zvláknování velmi zředěného roztoku za vzniku koloidních korálků se obvykle nazývá elektro rozprašování. Paprsek se rozdělí na jednotlivé nabitě částičky, které zaujmou tvar kapiček v důsledku působení povrchového napětí. Odpařováním rozpouštědla se zmenšuje velikost kapičky, zvyšuje se hustota náboje na povrchu a kapička se může dále rozdělit na menší, důsledkem vyššího elektrostatického odpuzování. Paprsek pod vyšší elektrostatickou silou je obtížnější rozdělit na menší částičky. Místo toho se tyto úseky prodlužují a tvoří se tenká vlákna [1].

Molekulová hmotnost v podstatě odpovídá propletení polymerních řetězců. Při stejné koncentraci polymerního roztoku snížení molekulové hmotnosti vede ke vzniku korálových vláken. Naopak zvyšování vede ke vzniku hladkých vláken. Je však důležité poznamenat, že přílišné zvýšení molekulové hmotnosti vede ke vzniku mikro stužek i při nižších koncentracích [20].

Viskozita roztoku je klíčová pro vláknennou morfologii. Bylo prokázáno, že pokud je viskozita roztoku příliš nízká, není možné získat kontinuální a hladká vlákna. Pokud je viskozita naopak vysoká, je těžké roztok tryskou zvláknit. Proto je požadavek pro vhodně zvolenou viskozitu. Obecně platí, že viskozitu roztoku můžeme ladit nastavením koncentrace roztoku – viskozita, koncentrace a molekulová hmotnost spolu úzce souvisí. Rozsah viskozity pro elektrostatické zvláknování je různý pro určitý polymer či oligomer [20].

Povrchové napětí je odlišné podle použitého rozpouštědla. Při fixní koncentraci roztoku, snížením povrchového napětí zamezuje vzniku korálků na vláknech a mohou být vytvořena hladká vlákna [20].

Povrchovým napětím lze tedy řídit vznik kapiček, korálků nebo vláken. Nižší povrchové napětí zvlákněvaného roztoku napomáhá zvláknovat v nižším elektrickém poli [1].

Vodivost / povrchová hustota náboje je dalším ze zástupců parametrů roztoku. Elektrostatické zvláknování zásadně potřebuje přenos elektrického náboje z elektrody na špičku zvlákněvané kapky. Minimální vodivost roztoku je tedy nezbytná k procesu, proto je nemožné zvláknovat roztoky s nulovou vodivostí. Používaná rozpouštědla mívají běžně vodivost nižší než je tomu u destilované vody. Vodivost se však zvýší v důsledku dostupnosti iontových látek z polymeru. Avšak se zvyšující koncentrací polymeru v roztoku může dojít ke snížení vodivosti [21].

Vodivost roztoku je dána především typem polymeru, druhem rozpouštědla a soli. Přírodní polymery jsou obvykle polyelektrolytické. Ionty zvyšují náboj nesoucí schopnost polymerního proudu. Podrobení přírodního polymeru vyššímu napětí v elektrickém poli má za následek vznik špatných vláken na rozdíl od syntetických polymerů. Elektrická vodivost může být vyladěna přidáním iontové soli, jako je NaCl, KH_2PO_4 , atd. Přídavkem iontové soli lze získat vlákna malých průměrů. Někdy lze roztok iontové soli nahradit přídavkem organické kyseliny jako rozpouštědla [20].

Dielektrická konstanta ϵ materiálu je v podstatě míra, jak účinně se soustřeďují elektrostatické linie toku, pokud jsou umístěny v elektrickém poli. V praktickém smyslu je měřítkem toho, jak velký náboj je schopno nést rozpouštědlo. Rozpouštědla s různou hodnotou ϵ budou vykazovat různé interakce, proto je důležitým parametrem pro elektrostatické zvláknování. U roztoků s vysokou dielektrickou konstantou má hustota náboje na povrchu trysky tendenci rovnoměrnějšího rozptýlení. To se promítá do vysoké kvality a produktivity nanovláken. Wannatong a kolektiv zkoumali produkci zvlákněného polystyrenu stoupající s dielektrickou konstantou použitého rozpouštědla.

Effekt dielektrické konstanty rozpouštědla na morfologii vláken dokládá srovnání kvality nanovláken z kopolymeru kyseliny mléčné a kyseliny glykolové (PLGA), v poměru 50:50 zvlákněných z 15 hm. % roztoku HFP ($\epsilon = 16,7$) nebo

chloroformu ($\epsilon = 4,81$) při teplotě 25°C. Střední hodnota průměrů vláken získaných z méně polárního chloroformu měly 760 nm, zatímco z HFP měly 310 nm.

Dalším příkladem ovlivnění morfologie nanovláken je polykaprolakton, kde jsou smíchána rozpouštědla chloroform a dimethylformamid. Pokud je podíl množství DMF ve směsi zvyšován od 0 do 10 hm. % (při stejné koncentraci polymeru), dojde k poklesu průměrů vláken ze 450 nm na 150 nm. To je pravděpodobně důsledkem zvýšení dielektrické konstanty, přidáním DMF ($\epsilon = 36,7$) [21].

1.7.2.2 Procesní podmínky zvlákňování

Napětí je klíčové v rámci elektrostatického zvlákňování. Pouze napětí vyšší než prahové umožní vytvoření trysky vycházející z Taylorova kužele. Pro vytvoření Taylorova kužele obvykle dostačuje pozitivní nebo negativní napětí vyšší než 6 kV [2].

Nicméně napětí používané u elektrostatického zvlákňování je u vytvářených vlákenných průměrů poněkud kontroverzní. Například Reneker a Chun prokázali, že účinek elektrického pole nemá velký vliv na průměry nanovláken polyetylen oxidu.

Několik skupin navrholo, že vyšší napětí má za následek vznik vláken s většími průměry - například Zhang a kolektiv zkoumali vliv napětí na průměry a morfologii vláken z polyvinylalkoholu / rozpouštědlo voda.

Naopak několik skupin navrholo, že vyšší napětí může zvýšit elektrostatickou sílu na nabitě trysce, což napomáhá zužování průměru vláken. Yuan a kolektiv zkoumali tento vliv napětí na uspořádání a morfologii u vláken polysulfon / dimetylacetamid / aceton.

Lze tvrdit, že napětí má vliv na průměry tvořených vláken. Úroveň významu se však mění v závislosti koncentrace polymerního roztoku a vzdálenosti špičky od kolektoru [20].

Napětí nemá vliv pouze na fyzikální vzhled, ale i na krystalinitu polymerních vláken. Elektrostatické pole může způsobovat lepší urovnávání molekul polymeru, tedy vyšší krystalinitu. Nicméně nad určitým napětím je krystalinita snižována.

Převážně je pro elektrostatické zvlákňování používáno stejnosměrné napětí, je však možné využít i střídavého potenciálu. Vznik vlákenného proudu a dloužení je způsobeno přítomností nábojů v roztoku. Nabíjení roztoku je velmi rychlý proces a proud vznikne ještě před změnou napětí ve zdroji. Jak vlákenný proud putuje ke kolektoru, pravidelné segmenty získávají pozitivní nebo negativní náboj. Protože je nestabilita proudu vláken výsledkem coulombových odpudivých sil v trysce, segmenty

pozitivního nebo negativního napětí snižují odpudivé síly, čímž se sníží ohybová nestálost proudu vláken. Protože je zde menší nestabilita a dloužení, výsledná vlákna mají vyšší průměr než vlákna zvlákněná stejnosměrným proudem při téže napětí. Výhodou střídavého napětí je, že nedochází k akumulaci náboje na uložená vlákna. Tak je získána silnější vrstva na uzemněném kolektoru [2].

Dávkování polymeru z trysky je dalším důležitým parametrem procesu. Obecně platí, že nižší průtok má dostatek času pro polarizaci polymerního roztoku. Bude-li průtok velmi vysoký, dojde k vytváření korálkových vláken s většími průměry z důvodu krátké doby schnutí před dosažením kolektoru a nízké protahovací síle [20].

Typ kolektoru může velmi ovlivnit vzniklou nanovláknennou vrstvu. Během procesu elektrostatického zvláknování slouží kolektor pro sběr nabitých vláken. Obecně lze jako kolektor použít hliníkovou fólii. Je však obtížné přenést získaná nanovláknena k dalším aplikacím. S potřebou přenášení nanovláken byly vytvořeny různé typy kolektorů, jako pletiva, rošty, otočné tyčky nebo kola, kapalně lázně, atd. [20]

Vzdálenost mezi tryskou a kolektorem, jak bylo prokázáno, ovlivňuje průměry vláken a morfologii vláknenné vrstvy. Pokud bude vzdálenost příliš krátká, vlákna nebudou mít dostatek času ke ztuhnutí před dosažením kolektoru, zatímco bude-li naopak příliš dlouhá, může dojít ke vzniku korálkových vláken. Je dobře známo, že jedním z důležitých fyzikálních aspektů je vysušení rozpouštědla, proto musí být vzdálenost optimální [20].

Průměr jehly (vnitřní) má také vliv na efekt vytvářených vláken. Bylo zjištěno, že zmenšení vnitřního průměru vede k redukci zanášení a tvoří se menší množství perliček ve zvlákněných vláknech. Zmenšení průměru také způsobuje snížení průměrů vyráběných vláken.

Pokud dojde ke zmenšení kapky na špičce kapiláry, jako je tomu v případě zmenšení průměru, povrchové napětí kapek se zvýší. Pro stejné dodávané napětí je zapotřebí větší síla k vytvoření vláknenného proudu. Důsledkem toho se zrychlení proudu snižuje a roztok má více času k protažení, než jsou vlákna shromážděna.

Je však třeba upozornit, že pokud by průměr jehly nebo pipety byl příliš malý, mohlo by být nemožné vytlačit kapku roztoku ke špičce kapiláry [2].

1.7.2.3 Okolní podmínky zvlákňování

Okolní podmínky mohou také ovlivnit průměry a morfologii vláken. Například Mituppatham a kolektiv prokázal, že zvýšením teploty dochází k tvorbě menších průměrů vláken z polyamidu 6. Nízká vlhkost vzduchu může zvýšit rychlost odpařování rozpouštědla nebo rozpouštědlo vysušit zcela. Pokud bude naopak vyšší vlhkost, vznikají vlákna větších průměrů. V důsledku neutralizace nabíjení vlákenného proudu se totiž zmenšují tahové síly [20].

Vliv má i okolní atmosféra, tedy složení vzduchu. Různé plyny mají odlišné chování ve vysokém elektrostatickém poli. Například hélium se vlivem vysokého elektrostatického pole rozpadá, a tudíž v něm není možné zvlákňovat. Pokud je použit plyn s vyšším průrazným napětím, jako je Freon ®, jsou vytvořeny vlákna s dvojnásobnými průměry, oproti těm zvlákněným na vzduchu při stejných podmínkách.

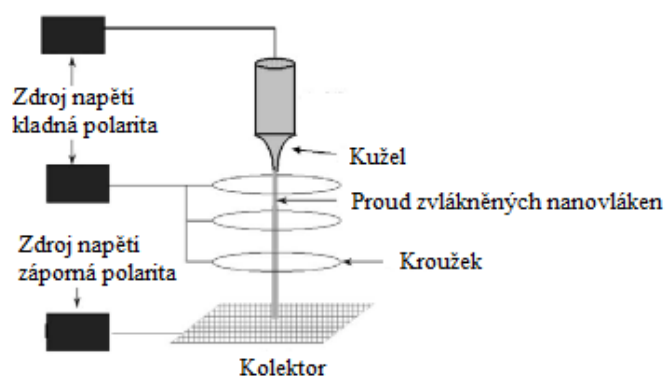
Lze zkoumat i vliv tlaku na proces zvlákňování v uzavřeném prostředí. Obecně snížení tlaku okolí zvlákňující trysky nezlepšuje proces. Pokud je tlak nižší než atmosférický tlak, polymerní roztok bude mít větší tendenci proudit ven z jehly a tam způsobit nestability v počátcích vlákenného proudu. Jakmile tlak klesá, dochází k probublávání polymeru na hrotu jehly. Při velmi nízkém tlaku není možno zvlákňovat vzhledem k přímému vybití elektrických nábojů [2].

1.7.3 Jednoosé orientované vrstvy a svazky vláken

Většina dosavadně vyráběných nanovláken je ve formě netkané vrstvy, která může být výhodně používána pro omezené aplikace, jako je filtrace, tkáňové struktury, implantátové potahové filmy a obvazové materiály. Tradiční vlákna v textilním průmyslu nám však ukazují, že pokud získáme jednotlivá nanovlákna, jednoosé svazky vláken nebo orientované vrstvy nanovláken, může dojít k rozšíření i do ostatních průmyslových oblastí. Příprava takových vláken je obtížná, protože trysková trajektorie polymeru je velmi komplikovaná. Nejedná se o přímkovou, ale o trojrozměrnou křivočarou trajektorii. Doposud bylo vytvořeno několik metod, které se pokouší přiblížit právě této orientaci nanovláknenných svazků a vrstev[8].

1.7.3.1 Pomocné kroužky v elektrostatické oblasti

Deitzel a spol (2001) prokázali lepší cílené urovnání nanovláken pomocí řady nabitých kroužků v elektrostatické oblasti (obrázek 15). Nabité kroužky měly stejnou polaritu jako povrchový náboj trysky a zvýšily tak přitlačnou sílu na trysku. Metoda umožnila ukládat nanovlákna pouze v úzkém pruhu 0,6 cm na rotující buben. Vzniklá vlákna dosahovala průměru 300 nm. Vytvořené polyetylen oxidové svazky nanovláken byly analyzovány pomocí širokoúhlé rentgenové difrakční techniky, kde byla u některých vláken nalezena špatná mikrostruktura [22].

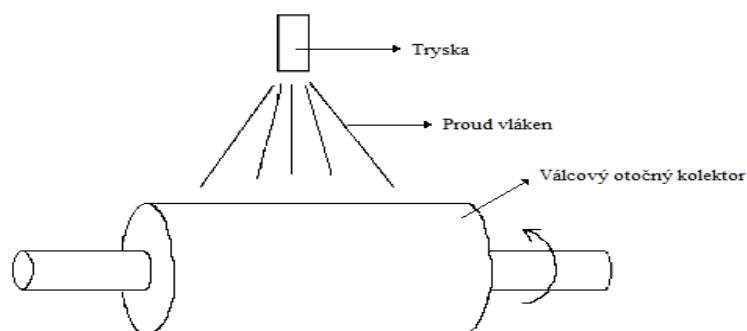


Obr. 15 Schéma zvláknění s pomocnými kroužky [22]

1.7.3.2 Válcový kolektor s vysokou rychlostí otáčení

Je předpokladem, že kolektor otáčející se rychlostí řádově tisíců otáček za minutu (obrázek 16), urovná vlákna vedením po obvodové straně. Metoda byla použita výzkumníky z Virginia Commonwealth University pro získání orientovaných nanovláken z kyseliny polyglykolové (PGA) při 1000 ot.min^{-1} a z kolagenu při

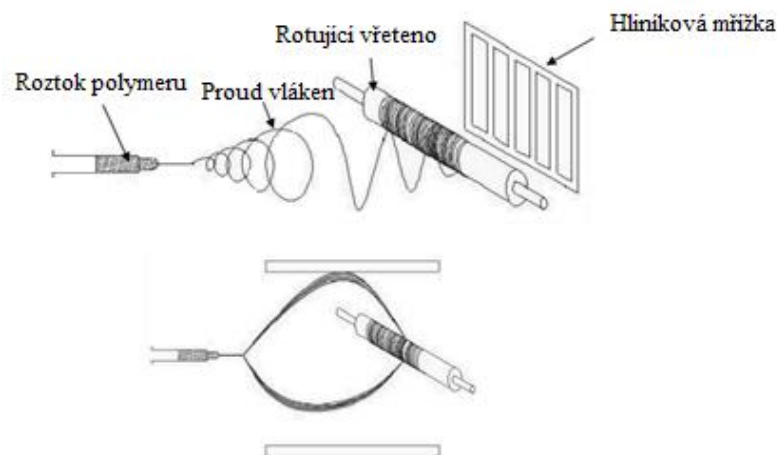
4500 ot.min⁻¹. K urovňání vláken však došlo pouze do určité míry. Stejněměrně rotující povrch válce slouží jako vlákenné navíjecí zařízení. Pokud jeho obvodová rychlost odpovídá rychlosti odpařovanému proudu, dochází k dobré orientaci (zarovnávací rychlost). Je-li povrch válce pomalejší než zarovnávací rychlost, vlákna začnou zaujímat náhodné pozice. Na druhou stranu existuje i limitní rychlost otáčení, kdy nemohou být sbírána kontinuální vlákna, protože se vlivem této rychlosti rozbije proud vláken. Vlákenné proudy jsou špatně kontrolovatelné, proto je těžké dosáhnout perfektního vyrovnání [8].



Obr. 16 Schéma zvlákňování na válcový kolektor s vysokou otáčkovou rychlostí [8]

1.7.3.3 Rotující kolektor s pomocným elektrickým polem

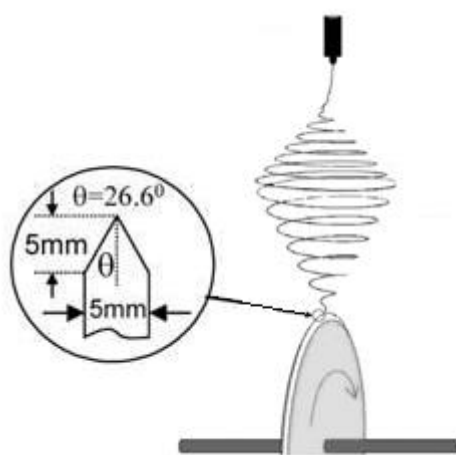
US patent 4689186 popsal metody k tvorbě trubcových produktů vhodných pro náhradu krevních cév, močovodů a žlučovodů. Unikátní vlastností tohoto vynálezu (obrázek 17) je, že mohou být uloženy v obvodovém směru vlákna za použití orientovaného pomocného pole. Podle Bornatovy předběžné studie byla sběrným zařízením teflonová trubička o průměru 4 mm, jejíž rychlost byla 1165 ot.min⁻¹, umístěná nad nabitou mřížkou. Kopolymer PLA-PCL dostal kladný náboj +12 kV. Pomocná mřížka je tvořena z propojených hliníkových fóliových pásků o šířce 5 mm a délce 30 mm, vzdálených od sebe 5 mm. Mřížka, nabitá na -8 kV, je umístěna 8 cm od sběrného vřetena. Efekt orientace vláken s použitím pomocného pole se výrazně zlepšuje oproti metodě bez použití pomocného elektrického pole [8, 23].



Obr. 17 Schéma zvlákňování na rotující kolektor s pomocným elektrickým polem [8]

1.7.3.4 Tenký kotouč s ostrou hranou

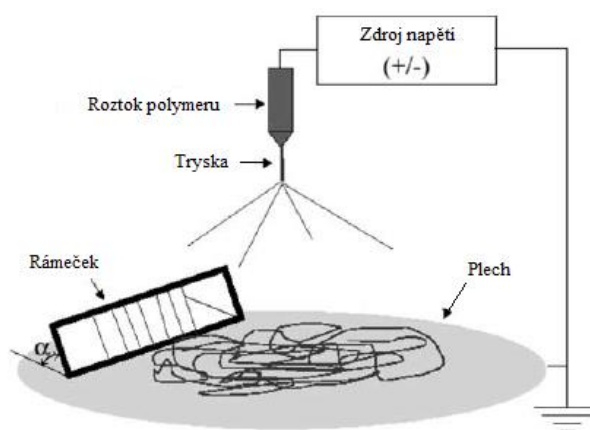
Metoda umožnila veliký pokrok ve shromáždění orientovaných nanovláken. Vlákná jsou ukládána na zužující se uzemněný kotouč (obrázek 18). Zúžený okraj kotouče koncentruje elektrické pole tak, že jsou téměř všechna vlákna průběžně navíjena na okraji rotujícího kola. Rozmezí průměrů vláken z polyetylen oxidu vyrobené touto metodou dosahovali 100-400 nm. Vzdálenost jednotlivých vláken se pohybuje v rozmezí od 1 do 2 μm . Vliv na morfologii má zbytkový náboj nanovláken, který je přítomen před dosažením elektricky uzemněného cíle. V důsledku toho je odpuzováno vlákno od vlákna spojeného s hrotem kotouče a tím dochází k oddělování uložených nanovláken. Sběrání nanovláken bylo prováděno lineární rychlostí 22 m.s^{-1} na hrotu kotouče, což odpovídá 1070 otáčkám za minutu [8].



Obr. 18 Schéma zvlákňování na tenký kotouč [8]

1.7.3.5 Rámový kolektor

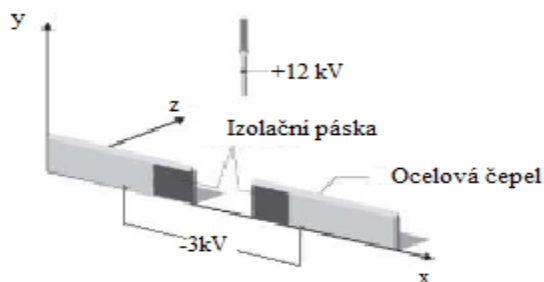
Jedná se o poměrně novou metodu pro získávání jednotlivých nanovláken. Pravoúhlá rámová konstrukce je jednoduše umístěna pod zvlákňovaný proud. Je zaznamenáno, že materiál rámové konstrukce má vliv na urovnání vláken. Například hliníkový rám vykazuje lepší urovnání vláken než dřevěný rám při použití stejného sklonu rámu 60° . Další výzkumy by měly prozkoumat vliv tvaru a velikosti rámových tyčí, vzdálenostmi rámových tyčí a velikost úhlu sklonu rámové konstrukce [8].



Obr. 19 Schéma zvlákňování na rámový kolektor [8]

1.7.3.6 Dva pevné body

Teo a Ramakrishna (2005) prokázali zhotovení nanovláknenných svazků, které byly sbírány mezi dvěma záporně nabitými čepelemi (obrázek 20). Čepele od sebe byly vzdáleny 3 cm. Během elektrostatického zvlákňování docházelo přednostně k ukládání vláken mezi čepele důsledkem koncentrace elektrostatického náboje na ostré hrany. Vlákeny se nejprve ukládaly na jednu z čepelí, poté dojde k natažení na druhou čepel působením elektrostatických sil. Během procesu zvlákňování nelze odstranit „zbloudilá“ neorientovaná vlákna, proto je požadován další krok – ponoření vláken do vody, kde dojde k seskupení vláken dohromady silou povrchového napětí vody. Výsledné svazky měly omezenou délku s dvěma pevnými konci. Svazky mohou být převedeny na jiné substráty a mohou být zakrouceny nebo ručně spleteny [22].

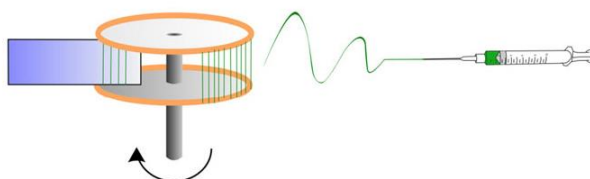


Obr. 20 Schéma zvlákňování na dvě ocelové destičky [22]

1.7.3.7 Plastové disky s vodivým okrajem

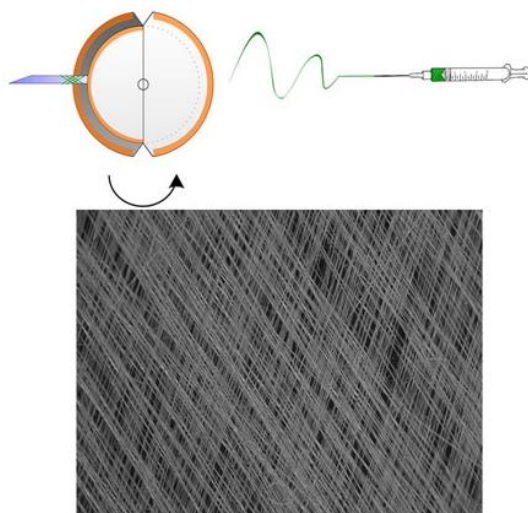
Zařízení je zkonstruováno ze dvou plastových disků spojených tyčí v jejich středech (obr. 21). Disky mají mezi sebou mezeru 1,5 cm. Okraje disků jsou pokryty tenkým proužkem mědi. Obdélníkový podklad mezi dvěma disky sbírá zarovnaná vlákna. Bylo použito několik materiálů pro sběrný podklad včetně teflonu, skla a uhlíkových pásků. Malé kladné napětí (+ 2 kV), které výrazně zvyšuje sběr vláken, je připojeno k měděným páskům. Zařízení se otáčí o rychlosti $7,5 \text{ cm.s}^{-1}$ na okraji disků. Jehla je umístěna ve vzdálenosti 10 cm a je použito záporné napětí (-10 kV).

Paralelní rotační disk pro tvorbu zakřivených polí je sestaven obdobně s výjimkou tvaru okrajů disků (obr. 22). Stacionární mezera byla vytvořena ze dvou kovových destiček s ostrými hranami. Otočné vřeteno má průměr 10 cm a otáčí se povrchovou rychlostí $8,2 \text{ m.s}^{-1}$.



Obr. 21 Schéma zvlákňování na plastové disky [24]

V této metodě jsou vlákna ukládána do menších prostor, než tomu bývá obvykle. Omezujícím aspektem může být, že ne všechna vlákna jsou sbírána přes mezeru, významná část vláken se nahromadí přes okraj a postupem času zasahují do procesu. Druhým omezením může být maximální vzdálenost disků, kdy při překročení dojde k přednostnímu ukládání na jednom okraji disku [24].

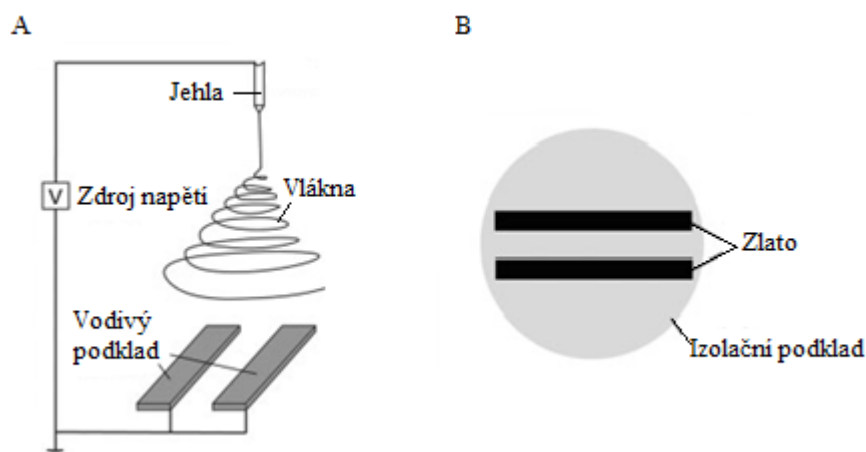


Obr. 22 Schéma disků pro tvorbu zkřížených vláken a pohled na vytvořenou vrstvu [24]

1.7.3.8 Vodivé destičky

Jednoose orientovaná nanovláknna lze získat jednoduchou a univerzální metodou. Schematické znázornění ukazuje obrázek 23A. Jedná se o metodu elektrostatického zvlákňování, kdy je uzemněná elektroda nahrazena kolektorem, skládající se ze dvou kusů vodivých křemíkových pásů oddělených mezerou různé šířky. Vláknna v mezeře jsou podélně řazena kolmo k okrajům silikonových pásů, zatímco na páscích je orientace zcela náhodná. Vzhledem ke vzniku orientované vrstvy nad mezerou je poté možné vlákna snadno přenést na povrch jiného podkladu. Je zde i možnost jednotlivě vyrobené vrstvy skládat na sebe a docílit tak různých vlákenných struktur. Kolektor pracuje dobře, pokud jsou vlákna průměrů větších cca 150 nm, jinak dochází k lámání nanovláken.

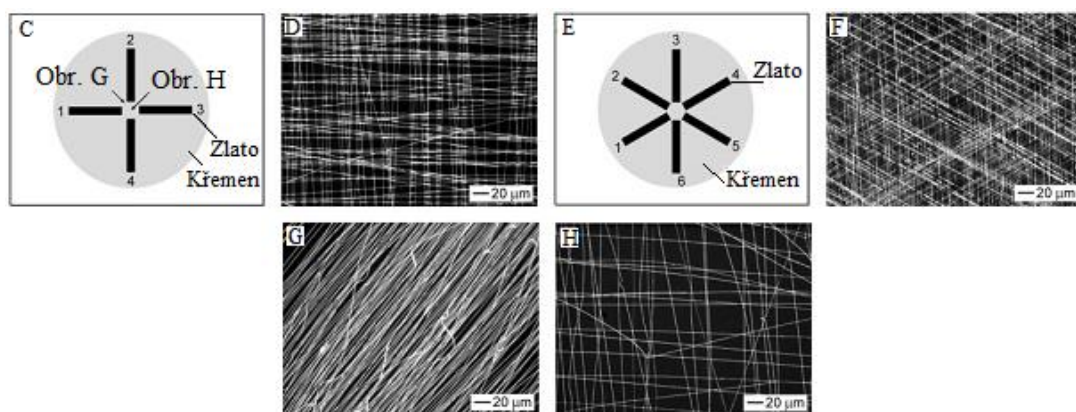
Typická konstrukce je na obrázku 23B, kde je použito dvou paralelních zlatých elektrod, vyrobených přímo na povrchu izolátoru tepleným odpařením. Vláknna jsou přes mezeru ukládána, pokud je zajištěna dostatečná izolace podkladu. Jako takový materiál se hodí křemen nebo polystyren.



Obr. 23 A - Schéma zvlákňování na zlaté vodivé destičky; B - Uložení dvou paralelních destiček [25]

Na obrázku 24C je schéma čtyř elektrod, které jsou uloženy na křemenném plátku odpařením zlata prostřednictvím fyzické masky. Pokud je uzemněn jen jeden pár elektrod, vlákna jsou ukládána pouze mezi odpovídající elektrody. Střídavým uzemněním dvojic elektrod lze získat dvojité vrstvenou síťku nanovláken (obr. 24D). Pokud byly uzemněny všechny čtyři elektrody současně, nejvíce vláken se ukládalo jako dobře orientovaná vrstva mezi nejbližší rohy přilehlé elektrody (obr. 24G). Pouze malý počet vláken je orientovaný mezi páry elektrod, kde tvoří síťku ve střední oblasti vzorku (obr. 24H). Obrázek 24E ukazuje další vzor, kde je šest zlatých elektrod. Elektrodové páry jsou střídavě uzemněny. Postupným ukládání jednoose orientovaných vláken otočených o 60° vzniká tří vrstvá síť.

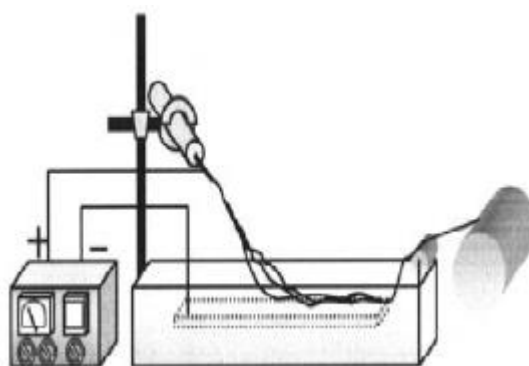
Použitím speciálně konstruované elektrody jako kolektoru by mohly být získány různé hierarchie orientovaných nanovláken na pevném podkladu. Takové struktury je okamžitě možno použít při výrobě elektronických a fotonických zařízení [25].



Obr. 24 C – Schéma uložení čtyř zlatých destiček; D – Vrstva nanovláken získaná ze schématu C střídavým uzemněním dvojic elektrod; E – Schéma uložení šesti zlatých destiček; F- Vrstva nanovláken získaná ze schématu E střídavým uzemněním dvojic elektrod; G, H – uložení nanovláken z míst značených ve schématu C [25]

1.7.3.9 Zvlákňování na povrch kapaliny

Khil a kol. a Smith a kol. (2005) použili kapalně médium pro sběr nanovláken a jejich následné navíjení do souvislých svazků (obr. 25). Nanovlákná zpočátku tvořila náhodnou vrstvu na povrchu kapaliny, následně byla vrstva tažena a vedena dále otočným vřetenem pro tvorbu svazku vláken. Působením povrchového napětí kapaliny byl svazek protažen a byl vytvořen kruhový průřez. Svazky vláken mohou být taženy rychlostí $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ až $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Jako sběrné médium je třeba zvolit kapalinu s vysokou hustotou nebo vysokým povrchovým napětím [22].

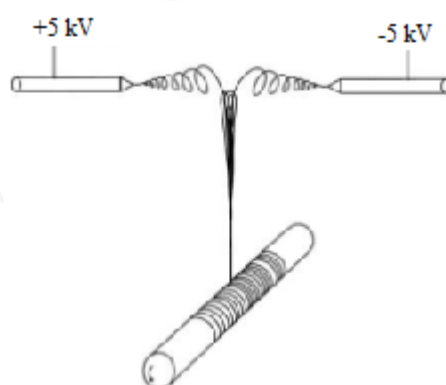


Obr. 25 Schéma zvlákňování na povrch kapaliny [22]

1.7.3.10 Zvlákňující trysky s opačnou polaritou

Pan a kol. (2006) použili pro získání kontinuálních orientovaných svazků speciální elektrostatické zařízení skládající se z páru zvlákňujících trysek s opačnou polaritou a rotující hřídeli jako kolektoru (obr. 26). V procesu získávají nanovlákná náboj dle zvlákňujících trysek, proto jsou k sobě přitahována za vzniku orientovaného svazku. Rychlost výroby svazku je závislá na rychlosti otáčení kolektoru, druhu polymerního materiálu a průměru vláken. Pro polyvinylpyrrolidonová (PvP) vlákna s průměrem 670 nm byla maximální produkční rychlost $14,9 \text{ m.s}^{-1}$.

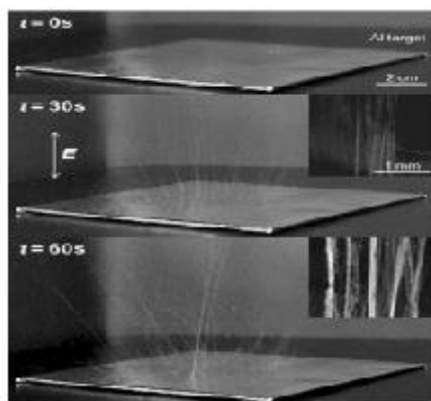
Li a kol. (2008) dále studovali účinek elektrostatické vzdálenosti a zjistil, že při vzdálenosti 20 cm jsou nanovlákná vázány těsně k sobě. Větší vzdálenosti má za následek vznik volně zhuštěných nanovláknenných svazků [22].



Obr. 26 Schéma zvlákňování pomocí trysek s opačnou polaritou [22]

1.7.3.11 Samo svazkování

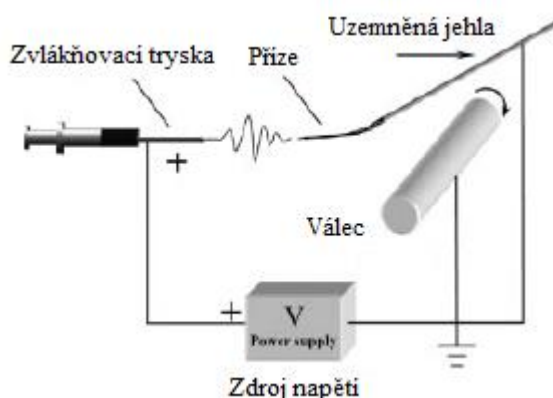
Okuzaki a kol. (2008) pozorovali tvorbu svazků polyfenylen vinyleny (PPV). Prekurzorem bylo běžné elektrostatické zvlákňování, kde byla tryska umístěna nad plochým uzemněným kolektorem. Tvorba neobvyklého svazku byla vysvětlena vodivou povahou použitého polymeru. Ukládaná vlákna byla vybíjena skrz polyelektrolytické řetězce na uzemněný cíl. Vlákně dává přednost umístění tak, aby se snížila mezera mezi vlákny a jehlou. Centimetr dlouhý svazek vznikl spontánně mezi jehlou a uzemněnou deskou během minuty (obr. 27). Následná tepelná přeměna vedla ke svazku PPV nanovláken [22].



Obr. 27 Pohled na svazek nanovláken v čase 0 s, 30 s a 60 s [22]

1.7.3.12 Jehlový kolektor

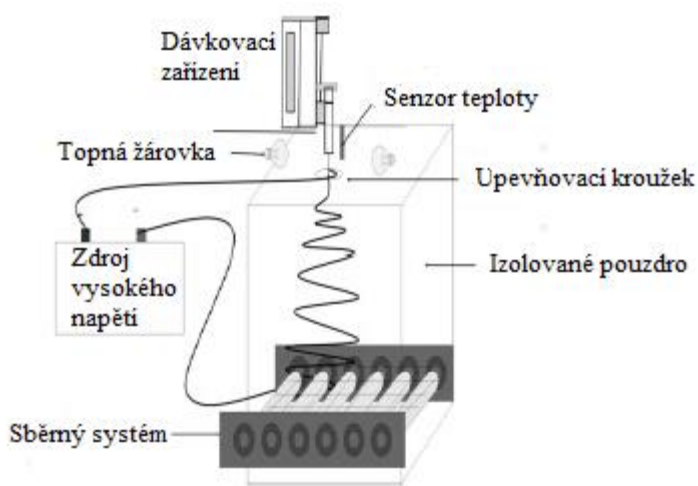
Wang a kolektiv (2008) uvedli způsob pro vlastní samo seskupování svazků nanovláken. Uzemněný hrot jehly byl včleněn do sběrného systému k vyvolání vlastního urovňání nanovláken (obr. 28). Bylo pozorováno, že proud kapaliny byl zpočátku přímý a následně se otočil tak, aby se dostal k blízkosti hrotu jehlovému kolektoru. Sešikmená vlákna se shromažďují na kolektorové jehle díky velké elektrostatické přitažlivosti. Zatáhnutím svazku zpět a navinutím na uzemněný kolektor je vytvořen kontinuální svazek nanovláken za předpokladu, že povrchová rychlost rotujícího válce odpovídá rychlosti růstu svazku. Samo svazkování se stalo jednodušší při zvýšení vodivosti polymerního roztoku a také bylo pozorováno vyšší urovňání vláken [22].



Obr. 28 Schéma zvlákňování pomocí uzemněné jehly [22]

1.7.3.13 Pomocný kroužek na zvlákňovací trysce

Mondal a kolektiv (2008) provedli manipulaci elektrického pole připojováním kroužku na zvlákňovací trysku těsně nad ústí pro samo sestavení vláken (obr. 29). Zahájení tvorby příze bylo provedeno zavedením skleněné tyčky, kdy byla příze přitažena ke konci tyčky. Pohybem skleněné tyčky od zvlákňovací zóny byla nanovlákněná příze připravena ručně. Tvorba nanovlákněné příze byla kontrolována teplotou, koncentrací polymeru a aplikovaným napětím [22].



Obr. 29 Zvlákňování pomocí kroužku na zvlákňovací trysce [22]

1.7.3.14 Zvlákňování střídavým proudem

Maheshwari a kolektiv (2009) uvádí sestavu více spletených nanovlákněných pramenů pomocí elektrostatického zvlákňování střídavým proudem. Nanovláknna jsou zvlákňována s pozitivními a negativními segmenty vlivem přepínání polarity. Vláknna zaznamenávají přitažlivé a odpuzivé díly, což vede ke zvýšení urovnání. Od zvlákňující trysky vznikl viditelný pramen, který může být snadno vychýlen a sbírán díky malé přitažlivosti směrem k proti elektrodě. Autoři také ukázali, jak střídavé napětí a frekvence ovlivňuje shromažďování vláken. Zvýšení frekvence potlačilo nestabilní bičování vlákněného proudu, což umožnilo snížit šířku vzniklého pramene, ale je zde více koráلكových vláken. Opačný efekt byl pozorován s narůstajícím napětím [22].

2 VYBRANÉ METODY STUDIA VLASTNOSTÍ NANOVLÁKENNÝCH VRSTEV

Níže budou popsány metody pro stanovení vlastností vlákených vrstev, které byly použity v experimentální části. Ke zjištění uspořádání vláken ve vrstvě bylo použito obrazové analýzy. Pro zjištění mechanických vlastností bylo použito tahových zkoušek.

2.1 Studium orientace vlákených vrstev

V následujících kapitolách bude popsána metodika studia organizace vlákených vrstev. Nejprve je zde uveden elektronový mikroskop, který je potřeba k pořízení snímků, na nichž je dále prováděno měření pomocí obrazové analýzy.

2.1.1 Elektronový mikroskop

Skenovací elektronový mikroskop (SEM) je zařízení sloužící ke sledování povrchů různých objektů, jehož obraz je tvořen pomocí sekundárního signálu, a to odražených nebo sekundárních elektronů. Jednou z předností mikroskopu je veliká hloubka ostrosti, díky které ve dvojrozměrných snímcích ze SEM můžeme nalézt určitý trojrozměrný zřetel.

Získávání obrazu je založeno na interakci primárního svazku s povrchem prohlíženého vzorku. Vzájemné působení primárních elektronů a atomů zkoumaného vzorku lze dělit do dvou skupin – elastické kolize, které elektrony zpětně odrazí a neelastické kolize, které předají energii primárních elektronů atomům vzorku. Poté dojde k uvolnění sekundárních a Augerových elektronů, rentgenovému záření a katodoluminiscenci.

K zobrazování povrchu se používá sekundárních elektronů vykazujících se nízkou energií a rychlostí oproti zpětně odraženým elektronům. Právě díky nízké energii se z vyvýšených míst na vzorku dostane do detektoru více sekundárních elektronů. Výsledkem je vyšší intenzita signálu z detektoru a na obrazovce se zobrazuje světlejší místo. Naopak je tomu u prohloubenin. Světlo se na obrazovce budou jevit místa s těžkými prvky, například kovy, které mají vyšší střední atomové číslo. Lehké prvky se budou zobrazovat jako tmavá místa [26].

Ke tvoření snímků pro zjišťování paralelizace vláken byl použit SEM mikroskop Tescan model VEGA 3 SB easyprobe s konvenční wolframovou vyhřívanou

katodou. Tento typ mikroskopu má k dispozici vysoký vakuační systém a různé tlakové varianty. Celý vnitřní tubus a preparátovou komoru je možno vysát na hodnotu vakua. U wolframové katody to znamená 10^{-2} až 10^{-3} Pa.

2.1.2 Obrazová analýza

K provedení obrazové analýzy je třeba použít k tomu určený software, například Lucia G nebo jako tomu bylo v našem případě NIS - elements. Pro některá měření je nutno provést kalibraci, kdy je připisován reálný rozměr obrazové mřížce. Samotné zpracování obrazu můžeme rozdělit do několika základních kroků. Rozdělení nemusí být vždy jednoznačně dané.

Snímání a digitalizace obrazu

Snímání je převod optické veličiny na digitální signál, který je spojitý v čase i úrovni. Vstupní informací při snímání může být jas z kamer či scanneru, intenzita rentgenového záření, ultrazvuk nebo tepelné záření. Zabývat se však budeme jasovou složkou z kamery.

Dále následuje převod spojitého analogového signálu na digitální signál. Digitální obraz je ekvivalentem spojitě obrazové funkce $f(i,j)$, kde i a j jsou souřadnice v prostoru. Vhodné rozlišení je jedním z nejdůležitějších faktorů digitalizace. Pokud je nízké, ztrácí se informace, pokud vysoké, je třeba vyšší výpočetní výkon. Velikost obrazu se většinou udává v pixelech, rozlišení se udává v bodech na palec.

Důležitá součást digitalizace je volba vzorovací mřížky. Nejčastěji používané jsou čtvercové a hexagonální. Důležitou vlastností je pak vzdálenost dvou obrazových bodů.

Barevnost je důležitým nositelem informace. Přesný odstín je definován dle různých barevných modelů, které se liší podle použitých složek. Model RGB je používán v zobrazovacích zařízeních, kde je jeden pixel tvořen třemi velmi blízko umístěnými body – modré, zelené a červené. Různým slučováním jednotlivých z hodnot vznikají barvy. Model CMY a CMYK je používán u tiskáren a výrobě fotografií. Barvy jsou zde odčítány od původní bílé, proto čím je vyšší složka dané hodnoty vyšší, tím se blížíme černé barvě. U modelu HSI nejsou složky tvořeny základními barvami, ale jejich vlastnostmi: barvou, sytostí a jasnem. Barva je zde určena jako úhel v rozmezí

$0^\circ - 360^\circ$. Barvy tvoří uzavřený kruh, proto je možno vybrat libovolný zlomek pro požadovanou barvu. Sytost udává množství přidané bílé složky. Jas udává, kolik světla daná barva odrazí. Dalším modelem je šedá škála, kde se užívá 256 odstínů [27].

Předzpracování obrazu

Obraz může být zkreslen po způsobu snímání, proto je možno tuto chybu napravit pomocí korekcí. Do předzpracování můžeme zařadit jasovou transformaci, geometrickou transformaci či filtraci a ostření [27].

Segmentace

Jedná se o jeden z nejtěžších kroků. Je nutno nalézt v obraze dané objekty, které budeme chtít dále zpracovávat. Výsledkem by měl být soubor oblastí, které odpovídají objektům ve vstupním obraze. Pokud je tomu tak, jedná se o segmentaci kompletní, pokud oblasti objektům neodpovídají, jde o segmentaci částečnou [27].

Popis obrazu

Existují dva základní způsoby popisu. První je založen na kvantitativním přístupu, tedy na popisu objektů pomocí souboru číselných charakteristik (např. velikost objektu). Druhý je kvalitativní přístup, kde jsou popisovány relace mezi objekty a jejich tvarové vlastnosti. Způsob je volen dle toho, k čemu bude využíván. Výběr popisu je závislý na použitém rozpoznávacím algoritmu [27].

Klasifikace

Je finálním krokem, kdy jsou ve většině případů řazeny objekty do předem známých tříd [27].

2.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti vypovídají o kvalitě vláken určených zejména pro technické účely. Právě tam je vyžadována odolnost vůči komplexním deformacím, zejména tahu [28].

Mechanické vlastnosti popisují schopnost těles změnit tvar, případně i objem působením vnějších mechanických sil. Taková síla vyvolá v tělese napětí σ a to vede ke

vzniku deformace ε . Pokud je rozložení síly F v ploše namáhaného průřezu S rovnoměrné, lze vztah vyjádřit matematicky $\sigma = F/S$.

Vztahuje-li se k počáteční ploše průřezu před namáháním, hovoříme o konvenčním napětí. Bude-li se plocha průřezu uvažovat po deformaci, jedná se o skutečné napětí.

Obecně v namáhaném průřezu působí dva druhy napětí, a to normálové napětí σ , působící kolmo na plochu průřezu a smykové napětí τ , působící v rovině plochy průřezu [29].

U vláknenných útvarů jsou mechanické charakteristiky závislé na chemickém složení (mezimolekulové vazby), molekulové hmotnosti polymerních řetězců (M_n) a podmínkách zvláknování, případně fixace (orientace amorfni a krystalické fáze). Většinou je měřena odezva na vnější síly a volí se buď jednoosé namáhání, kdy je zkoušen tah a tlak nebo víceosé namáhání pro ohyb a krut. Dále můžeme namáhání rozlišovat dle opakování na prosté a cyklické, dle času na statické, časově závislé (relaxace napětí, creep) a dynamické namáhání. Také záleží na tom, jestli jsou vlákna namáhána do přetrhu nebo nedochází k porušení vláken. Vidíme tedy, že existuje celá řada způsobů namáhání, které dávají různé informace o mechanických projevech vláken. Je tedy nutno vytvořit určité modely, které charakterizují minimální souvislost mezi deformací, napětím, časem, případně teplotou. U polymerních vláken je to ztíženo ještě několika dalšími faktory:

- Oblast platnosti lineární viskoelastivity je tak omezená, že je takřka všemi experimenty překročena. Pak nelze brát určené parametry za materiálové konstanty.
- Vnější síly způsobují trvalé strukturní změny, které se projevují jak změnou orientace, tak často změnou zastoupení různých fází.
- Polymerní vlákna mají „v paměti“ svojí deformačně teplotní minulost, která má vliv na mechanické experimenty.

Změny struktur nejsou experimentálně stanovitelné, proto se často odhaduje na základě mechanických modelů. Popis viskoelastických projevů vláken je vždy určitým přiblížením reality [28].

2.2.1 Jednoosá deformace

Základní jednoosou deformační zkouškou je tahová zkouška, kdy je sledován vztah mezi silou a protažením vláken. Působením postupně rostoucí síly jsou vlákna prodlužována až do jejich přetrhu. Pracovní diagram charakterizuje počáteční modul E (směrnice tečny v počátku k pracovnímu diagramu vláken) a souřadnice bodu přetrhu. Působením síly F je původní délka vlákna l_0 prodloužena na délku l a příčný řez S_0 je zúženo na S . Namísto absolutní síly F [N] se používá síly relativní F_r [N.tex⁻¹], případně napětí σ [M.m⁻² = Pa]. Při porovnávání vláken pro technické použití je nutno posuzovat pevnostní údaje s ohledem na jejich hustotu. Standardně je používána deformace definovaná jako:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1)$$

Důležitou charakteristikou deformace vláken je tzv. Poissonův poměr ν definovaný jako:

$$\nu = \frac{\text{příčné zkrácení}}{\text{podélné prodloužení}} = -\left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon}\right), \text{ kde } \varepsilon_t = \frac{S - S_0}{S_0} \quad (2)$$

Poissonovým poměrem můžeme určit změnu objemu původního vlákna V_0 na objem vlákna deformovaného. Z toho můžeme odvodit vztah:

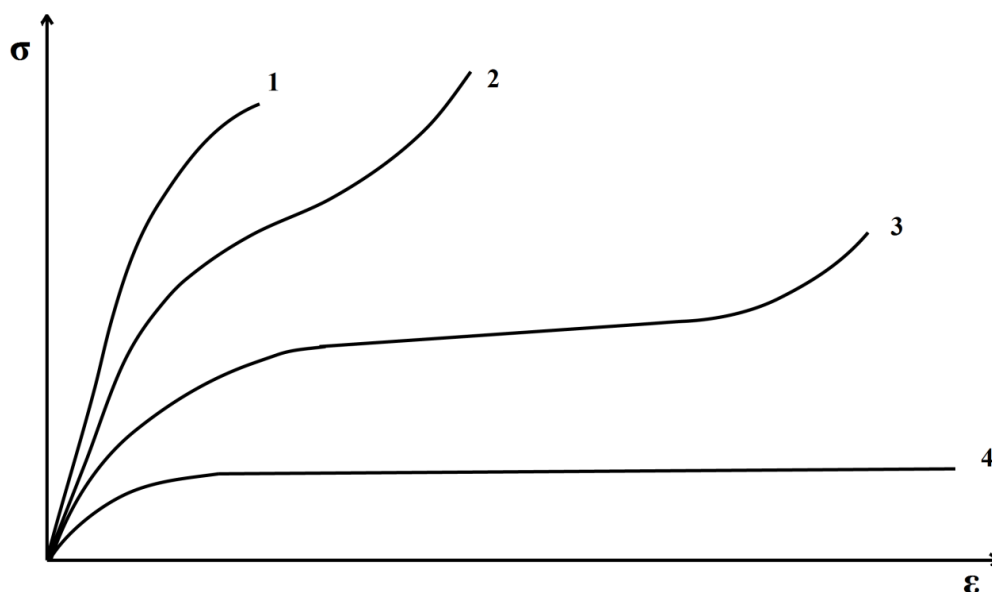
$$\frac{V}{V_0} = (1 - \nu \varepsilon)^2 (1 + \varepsilon) \approx (1 - 2 \nu) \varepsilon \quad (3)$$

Pokud se objem při deformaci nemění, vyjde hodnota ν rovna 0,5. Takový výsledek vykazuje kaučuk a kapaliny. Pro většinu textilních vláken platí větší natáhnutí materiálu než jeho zúžení a hodnota ν se pohybuje v rozmezí od 0,2 do 0,45 [28].

2.2.2 Pracovní křivka tahové zkoušky

Dle pracovního diagramu můžeme tvrdit, že čím je křivka strmější, tím má materiál větší odpor vůči deformaci a naopak, čím je dosaženo větších deformací, tím je materiál poddajnější a houževnatější. Různé průběhy křivek jsou závislé na typu zkoušeného materiálu (obr. 30). Křivka 1 je typická pro křehké, sklovité polymery,

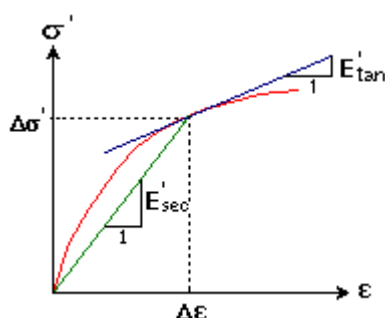
k jejichž porušení dochází bez větší deformace. 2. křivkou se vykazují viskoelastické polymery. Pryže a kaučuky lze podrobit vysokým deformacím bez nutnosti neustálého zvyšování napětí (3. křivka). Charakteristickou vlastností plastických látek je růst deformace při konstantním napětí, což ukazuje 4. křivka [29].



Obr. 30 Pracovní křivky různých materiálů; 1 – křehké, sklovité materiály; 2 – viskoelastické polymery; 3 – pryže a kaučuky; 4 – plastické látky

Pro číselnou charakteristiku strmosti pracovní křivky jsou zavedeny určité konvenční veličiny:

- Počáteční modul E – definuje ho strmost křivky při nulové deformaci
- Tangentový modul E_t – definuje ho strmost křivky při libovolné nenulové deformaci (E_{tan} na obr. 31)
- Sekantový modul E_s – v libovolném bodě ho definuje směrnice přímky spojující počátek s tímto bodem pracovní křivky (E_{sec} na obr. 31)



Obr. 31 Tangentový a sekantový modul na tahové křivce [30]

V každém bodě je tedy možno definovat dva rozdílné moduly – tangentový a sekantový. Tyto veličiny udávají přibližnou velikost odporu proti deformaci v určitém bodě nebo úseku pracovní křivky. Tangentový a sekantový modul jsou v lineárním úseku křivky v podstatě totožné s okamžitým modulem, který je pro libovolný bod dán vztahem: [29]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

2.2.3 Mechanické vlastnosti stanovené na základě konvenční tahové zkoušky

Pracovní křivka tahové zkoušky u textilních vláken ze syntetických materiálů má typický esovitý tvar. Ideálně se z takového grafu dá určit několik důležitých bodů – σ_e , σ_u , σ_k a σ_p [29].

Mez pružnosti σ_e – lze fyzikálně definovat jako napětí, při kterém ještě nevzniká trvalá (plastická) deformace. Předpokládá se, že deformace vzniklé do tohoto bodu jsou elastické, tedy vratné. V reálu však už u minimálních napětí vznikají malé plastické deformace, proto neexistuje ostré rozhraní elastickou a plastickou deformací. Mez pružnosti z tohoto důvodu nelze experimentálně stanovit. Je tedy definována jako napětí, které způsobí trvalou deformaci určité minimální velikosti, například 0,005 % nebo 0,01 %.

U polymerních materiálů je výskyt čisté elasticity, a tedy i meze pružnosti problematický. I vysoce krystalické polymery mají ve struktuře určité množství méně uspořádaných až amorfních oblastí, ve kterých je možnost viskózního nebo plastického toku. Jsou zde tedy částečně vratné deformace závislé na čase nebo deformace nevratné, proto u textilních vláken nemá smysl o mezi pružnosti hovořit [29].

Mez úměrnosti (linearity) σ_u - lze fyzikálně definovat jako nejvyšší napětí, kdy ještě platí úměrnosti mezi napětím a deformací. Pokud se jedná o deformace elastické, tedy časově nezávislé, jedná se o tzv. Hookeův zákon, kdy je teoreticky mez úměrnosti totožná s mezí pružnosti. U polymerních textilních materiálů deformace nevznikají okamžitě, ale postupně s dobou zatížení narůstají. Jsou postupně vratné v závislosti na době uplynulé po odlehčení. Takové deformace nazýváme viskoelastické. Zákon lineární úměrnosti je pak složitější a mez linearity nelze přesně určit z tahové křivky.

Deformace související s mezí úměrnosti ε_u bývá u textilních vláken velmi nízká, většinou v rozmezí 0,2 – 0,5 %) [29].

Mez kluzu σ_k – udává nejmenší hodnotu použitého napětí, od něhož začíná výrazná plastická (nevratná) deformace. Tato mez je výrazná pouze u některých materiálů, jako je nízkouhlíková ocel nebo slitiny uhlíku. U polymerů je tato mez popsána dvěma rovnocennými domluvami. Definicí podle Mereditha je mez kluzu dána bodem dotyku tečny k pracovní křivce vedená rovnoběžně se spojnicí mezního bodu s počátkem. Coplanovu definici lze využít, pokud má křivka esovitý tvar. Pak je mez kluzu dána jako průsečík dvou za sebou následujících prodloužených přímkových úseků uvažovaných od počátku pracovní křivky. Hodnoty obou metod se liší u téže materiálu jen velmi málo [29].

Pevnost σ_p – jedná se o mezní napětí, kdy po překročení dojde k trvalému porušení soudružnosti materiálu [29].

Na základě konvenční tahové zkoušky lze tedy u polymerů stanovit:

- přesnou pevnost a tažnost
- přibližné rozhraní mezi vratnými a nevratnými deformacemi (mez kluzu)
- odhadem mez linearity (bez rozeznání elastické nebo viskoelastické)

2.2.4 Základní typy zkoušek

Při stálosti struktury a stejných vnějších podmínek (teplota, vlhkost, upnutí) se v experimentech mohou měnit tři veličiny, a to napětí, deformace a rychlost deformace. Každou jednu z těchto veličin můžeme držet na konstantní hodnotě a podle toho rozlišujeme tři typy zkoušek.

Zkoušky s konstantní deformační rychlostí

Je sledována závislost σ na ε , kdy je vzorek prodlužován s konstantní rychlostí. Aby bylo možné vlastnosti textilních materiálů porovnávat, je normou dána rychlost deformace tak, aby k přetrhu došlo ve předepsanou dobu.

Zkoušky s konstantním napětím, tzv. creep ($\sigma = \text{konst.}$)

Vzorek je zatížen stálým deformačním napětím a je sledován postupný růst deformace s časem.

Zkoušky s konstantní deformací, tzv. relaxace napětí ($\epsilon = \text{konst.}$)

Vzorek je deformován konstantní rychlostí na určitou hodnotu deformace. Po zastavení deformace dochází k poklesu napětí s časem.

Právě creep a relaxace napětí hrají významnou roli zejména u polymerních, u kterých je silná závislost mechanických vlastností na čase, hlavně u přechodové skelné oblasti. Nejčastěji jsou zkoušky u polymerů prováděny v oblasti viskoelastických deformací [29].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část se zabývá výrobou a testováním nanovláknenných vrstev vytvořených při odlišných podmínkách zařízení a z různých polymerních roztoků. Bude testována schopnost orientace nanovláken ve vrstvě a mechanické vlastnosti těchto vrstev.

3.1 Použitá zařízení

V této kapitole jsou popsána zařízení, která byla použita pro tvorbu nanovláknenných vrstev určených pro další testování.

3.1.1 Zařízení pro získávání tubulárních útvarů z vrstev nanovláken

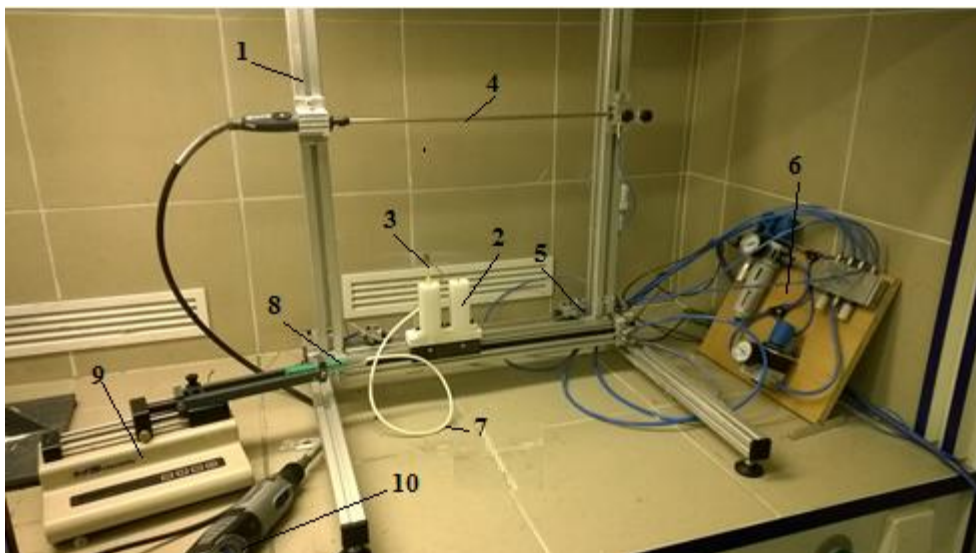
K výrobě nanovláknenných vrstev bylo použito laboratorní zařízení pro elektrostatické kapilární zvlákňování (obr. 32). Jedná se o zařízení pro tvorbu tubulárních prvků s určitým množstvím orientovaných vláken.

Zařízení se skládá z rámové konstrukce, v jejíž horní části jsou posuvné úchyty, kterými lze nastavit vzdálenost kolektoru od zvlákňovací jehly. V pravém úchyty jsou umístěna dvě kuličková ložiska, do kterých je vsazen kolektor (nerezová tyčka), v našem případě o průměru 6 mm (lze použít i jiné průměry). Do levého úchyty je upevněno sklíčidlo, do něhož se zasouvá zúžený konec kolektoru. Sklíčidlo je propojeno ohebným hřídelem s elektromotorem, na kterém můžeme navolit libovolný počet otáček, a tím i otáčky kolektoru.

V dolní části rámu se nachází posuvná konstrukce pro vložení zvlákňovací jehly, která se pohybuje pomocí bezpístnicového válce s lineárním posuvem. Na obou koncích dráhy – úvratích, jsou dorazové ventily. V těchto úvratích se posuvná konstrukce pomocí natlakovaného vzduchu vrací vždy k druhému konci. Obě úvratě je možno posouvat, měnit tak jejich vzdálenost a tím můžeme do určité míry ovlivnit délku zvlákňování na kolektoru.

Součástí zvlákňovacího zařízení je panel pro ovládání vzduchu. Nalézá se zde hlavní ventil, regulátor tlaku, ventil s ukazatelem tlaku pro pohyb posuvu jehly a dva regulátory průtoku.

Zařízení dobře slouží k prvotním experimentálním zkouškám. Je poměrně snadno přemístitelné. Umístění je však omezeno pouze na místa s rozvodem vzduchu. V našem případě bylo zařízení umístěno do digestoře z důvodu odpařování rozpouštědel.



Obr. 32 Popis zařízení pro tvorbu tubulárních prvků: 1 – pevná rámová konstrukce, 2 - posuvná konstrukce pro vložení jehly, 3 – zbroušená jehla připojená ke zdroji napětí, 4 – kolektor, 5 – úvrať, 6 – panel pro ovládání vzduchu, 7 – přívod polymerního roztoku k jehle, 8 – injekční stříkačka, 9 – injekční pumpa, 10 – elektromotor

3.1.2 Zdroj vysokého napětí

Ke zvlákňování je nutný zdroj. Na zdroji je možné navolit hodnotu napětí. Napětí ze zdroje je propojeno kabelem se zvlákňovací jehlou. Zdroj i konstrukce zvlákňovacího zařízení jsou uzemněny.

3.1.3 Injekční pumpa

Dalším nutným zařízením pro umístění injekční stříkačky a přesné dávkování polymerního roztoku ke zvlákňovací jehle je injekční pumpa. Hrot zvlákňovací jehly je zbroušen, aby nedocházelo k tvorbě nesouměrné kapky a tím k nerovnoměrnému zvlákňování. Injekční stříkačka je s jehlou spojena hadičkou o takové délce, aby bylo možno dávkovat polymer po celé dráze jehly. Pro zvlákňování polyvinylalkoholu a polykaprolaktonu byla použita polyesterová hadička z infuzní sady. U polyuretanu bylo nutno použít hadičku silikonovou, protože způsoboval u polyesterové hadičky degradaci.

3.2 Použité polymerní roztoky

Pro elektrostatické zvlákňování byly vybrány tři různé polymery, ze kterých byly zvlákňovány vzorky pro další testování.

3.2.1 Polyvinylalkohol (PVA)

Jako prvního polymeru bylo použito polyvinylalkoholu. Výchozí koncentrace PVA byla 16 hm. % ve vodě. Receptura byla následující:

- 100 ml 16 % PVA
- 24 ml vody
- 0,96 ml Glyoxalu 40 %
- 0,5 ml H_3PO_4 85 %

Polyvinylalkohol je bílý krystalický prášek. Vyrábí se hydrolýzou polyvinylacetátu, proto obsahuje vždy určité množství polyvinylacetátových skupin. To je příčinou dosti proměnlivých vlastností a množství těchto skupin ovlivňuje i odolnost vůči rozpouštědlům (při vyšším než pětiprocentním počtu vinylacetátových jednotek se ve vodě rozpouští při teplotách nad 65°C). V jednosytných alkoholech bobtná, ve vícesytných se rozpouští, zvláště při vyšších teplotách. Odolává organickým kyselinám a anorganickým kyselinám ve vodných roztocích. Lze jej používat při teplotách od -50°C do 130°C , při teplotě nad 200°C degraduje.

PVA se používá v potravinářském průmyslu (příprava ovocného želé), v chemickém průmyslu jako ochranný koloid pro suspenzní polymerace, zahušťovadla pro nátěrové hmoty, k výrobě lepidel. Slouží k výrobě textilních vláken, obalových fólií, těsnění, atd. [31]

3.2.2 Polykaprolakton (PCL)

Druhým vybraným polymerem byl polykaprolakton, jehož výchozí formou byly granule o molekulové hmotnosti M_n 45 000. Byl připraven PCL 8-1-1 (chloroform-etanol-kyselina octová) dle následující receptury:

- 3,2 g PCL
- 13,44 g chloroform
- 1,68 g etanol
- 1,68 g kyselina octová

Obecně je polykaprolakton připravován polymerací za otevření kruhu ϵ - kaprolaktonu [32]. Teplota tání je přibližně 60°C a teplota skelného přechodu - 60°C.

Díky přítomnosti esterových vazeb může být přizpůsoben a následně mineralizován různými druhy mikroorganismů, jako jsou bakterie, plísně, kvasinky nebo houby, běžně se vyskytující v přírodě.

Velké uplatnění našel v oboru biomedicíny z hlediska své biokompatibility. Řada testů prokázala, že v první fázi probíhá pouze hydrolytická degradace PCL v závislosti na jeho výchozí molekulové hmotnosti, trvající řádově roky [33].

Lze jej také využít jako matrici v systémech s řízeným uvolňováním léčiv, nejlépe s pracovní dobou životnosti 1-2 roky [32].

Další možností jeho aplikace je přísada do pryskyřic, kde zlepšuje jejich vlastnosti pro zpracování. Díky kompatibilitě s jinými druhy materiálů může být míchán se škrobem pro zvýšení biologické rozložitelnosti nebo může být přidáván jako polymerní změkčovadlo do PVC [34].

3.2.3 Polyuretan (PUR)

Posledním vybraným polymerem byl polyuretan. Výchozí látkou byl 30 hm. % laritanu v dimethylformamidu. Dále došlo ke zředění polymeru na 16% hm. Receptura byla následující:

- 48 g 30% Laritanu
- 42 g dimethylformamidu

Polyuretany patří do rozsáhle skupiny polyesteramidů. Z chemického hlediska se tedy jedná o kombinaci polyesterů a polyamidů. Lze je připravovat z vícefunkčních izokyanátů a látek obsahující hydroxylové skupiny. Mezi nejvýznamnější patří polyuretany vyráběné polyadici z hexametylendiizokyanátu (1,6-diizokyanátohexanu) a 1,4-butylenglykolu (1,4-butandiolu). Takto se vyrábí ze směsi přímo nebo v prostředí rozpouštědla, kdy lze snadněji odvádět uvolněné teplo při exotermní reakci. Množstvím odvedeného tepla, dobou setrvání v roztaveném stavu a molárním poměrem diizokyanátu k diolu lze ovlivňovat střední molární hmotnost vyráběného polymeru. Lineární polyuretany mají střední molární hmotnost v rozsahu od 7 kg.mol⁻¹ do 12 kg.mol⁻¹, pokud hodnota přesáhne 15 kg.mol⁻¹, jedná se o částečně slabě zesíťované polymery.

PUR z výše zmíněných výchozích látek jsou silně krystalické bílé hmoty s teplotou tání cca 180°C. Při teplotách nad 220°C jsou rozkládány na své složky. Jeho přednosti spočívají v nižší navlhavosti, lepších elektroizolačních vlastnostech, větší odolnosti vůči vodě, kyselinám a povětrnostním vlivům. Při běžných teplotách jsou rozpustné pouze ve fenolech a v kyselinách mravenčí a sírové. Lze je zpracovat vstřikováním, lisováním a zvlákňováním.

Je možno vyrábět polyuretany tvrdé (hustoty v rozmezích 10 kg.m⁻³ do 600 kg.m⁻³), měkké (hustoty v rozmezích 15 kg.m⁻³ do 70 kg.m⁻³), lineární či síťované. Postihují tedy celou řadu vlastností. Mezi základní patří extrémní odolnost vůči oděru, dobrá adheze k různým materiálům (kovové i polymerní), stálosti ve vodním prostředí a zředěném vodním prostředí kyselin a zásad [31].

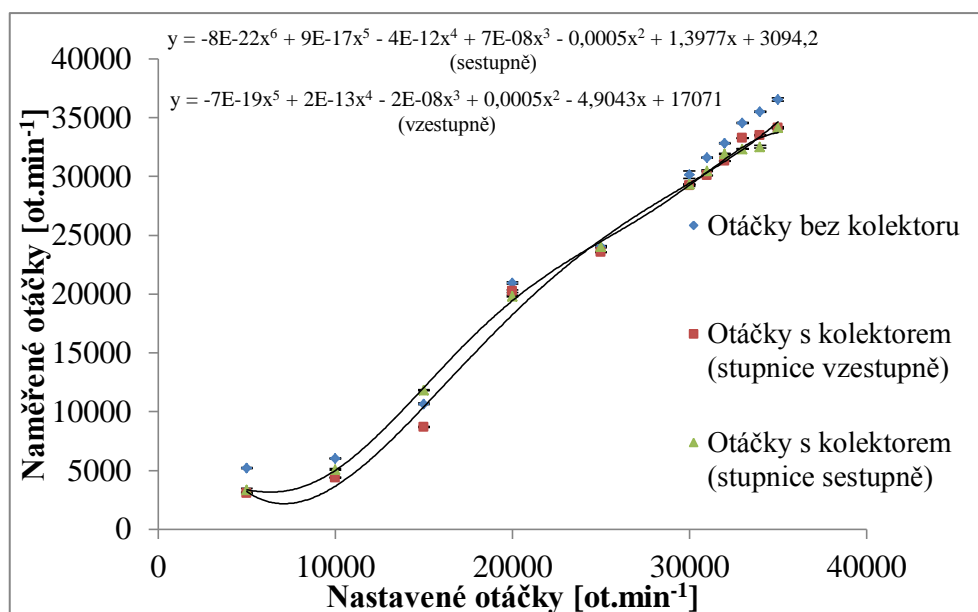
3.3 Stanovení parametrů zařízení

Protože se jedná o neotestované zařízení, bylo třeba stanovit určité parametry, které usnadní práci při dalším používání. Bylo provedeno stanovení otáček kolektoru, které se mohou lišit od těch volených na stupnici. Dále byla zjištěna rychlost, kterou se pohybuje zvlákňovací jehla a stanoveny vlastní frekvence kolektoru.

3.3.1 Stanovení otáček kolektoru

Níže je popsáno stanovení otáček hřídele v závislosti na otáčkách nastavených na jeho pohonu. Důvodem je fakt, že stupnice má pouze orientační charakter a není nijak kalibrována.

Postup experimentu byl následující: po spuštění pohonu hřídele byly na jeho stupnici nastaveny požadované otáčky. Pro měření otáček kolektoru byl použit digitální otáčkoměr Voltcraft DT-2 L/K. Otáčky byly měřeny na sklíčidle držícím kolektor. Měření probíhalo nejprve bez kolektoru, poté i s kolektorem. Při každé zvolené rychlosti proběhlo pět měření. Ze zjištěných dat byla vypočtena střední hodnota, směrodatná odchylka a 95% interval spolehlivosti. Graf 2 ukazuje získané závislosti nastavených a skutečně naměřených otáček. Tabulky s naměřenými a statistickými výpočty jsou umístěny v příloze č. I.



Graf 2 Porovnání naměřených otáček s hřídelí a bez hřídele

Z grafu je patrné, že otáčky s upevněným kolektorem jsou poněkud nižší, nežli je tomu bez kolektoru. Pokud na stupnici je navoleno 5000 ot.min^{-1} , což je minimální možná nastavitelná hodnota, vlivem kolektoru dojde ke snížení až o 2000 ot.min^{-1} . Je také patrné, že je nutno dbát na to, kterým směrem se pohybujeme po stupnici, protože se výsledné otáčky na kolektorové tyčce mohou lišit. K tomuto jevu dochází nejvíce u volené hodnoty $15000 \text{ ot.min}^{-1}$, kde po zvolení dané hodnoty byl naměřen rozdíl více než 3000 ot.min^{-1} . U otáček $33000 \text{ ot.min}^{-1}$ a $34000 \text{ ot.min}^{-1}$ je pak rozdíl 1000 ot.min^{-1} .

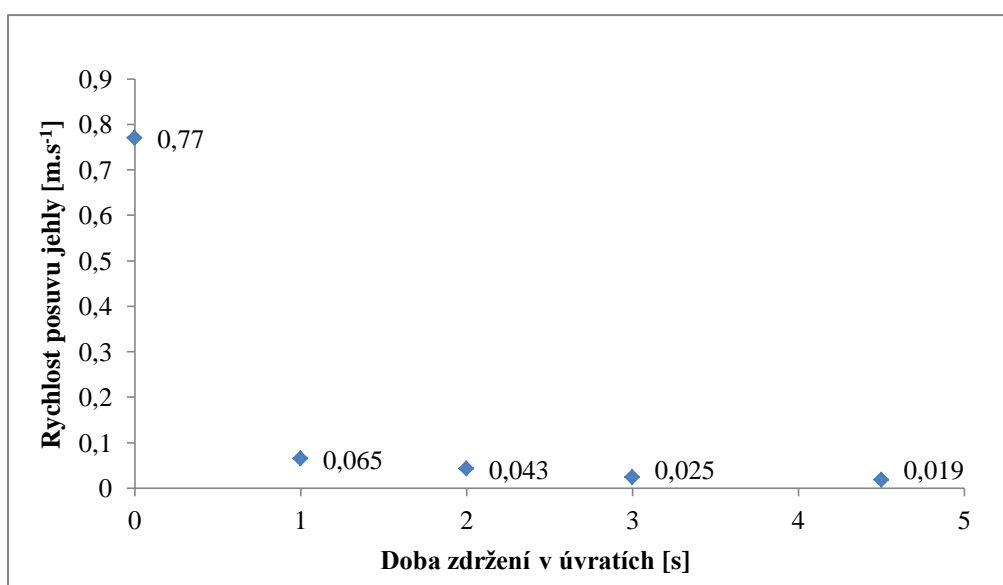
Dále u volených otáček $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ nedochází k odpovídajícímu nárůstu otáček na kolektoru.

3.3.2 Rychlost posuvu jehly

Rychlost posuvu byla regulována dvěma ventily, z nichž každý reguluje rychlost posuvu a také dobu setrvání v úvrati. Byla zjištěna vzdálenost, kterou jehla překoná od jedné úvrati k druhé. U vyšších rychlostí dochází vždy k určitému přesahu posuvu nosiče jehly oproti nastaveným hodnotám. Tento přesah narůstá s rostoucí rychlostí posuvu. U nejvyšší rychlosti je to až 18 mm . Postup měření byl následující: při maximální možné rychlosti byl odměřen čas 10 vteřin a bylo počítáno, kolikrát jehla po této dráze přejede. Počet přejezdů vynásobený drahou jehly udává celkovou uraženou vzdálenost v čase 10 vteřin . Po vydělení tímto časem získáme rychlost jehly za jednotku sekundy. Maximální rychlost posuvu jehly je $0,77 \text{ m.s}^{-1}$.

Stanovení nejnižší možné rychlosti, kdy se jehla ještě pohybuje plynule, probíhalo odměřením času, který jehla vykonala z úvrati zpět na výchozí místo (bez zdržení v úvrati). Při takto nízké rychlosti posuvná konstrukce setrvává v úvrati, než se dá opět do pohybu vlivem nárůstu tlaku na potřebnou hodnotu. U takto zvolené rychlosti je to doba cca 4,5 vteřiny. Pokud celkovou dráhu vydělíme naměřeným časem, získáme rychlost jehly za jednotku sekundy. Výsledná nejnižší rychlost je $0,019 \text{ m.s}^{-1}$.

Stejným způsobem proběhlo zjišťování rychlosti při zdržení v úvratích v čase 1 s, 2 s a 3 s (graf 3). Bylo nutno přesně nastavit oba ventily, aby v obou úvratích jehla zůstávala stejnou dobu.



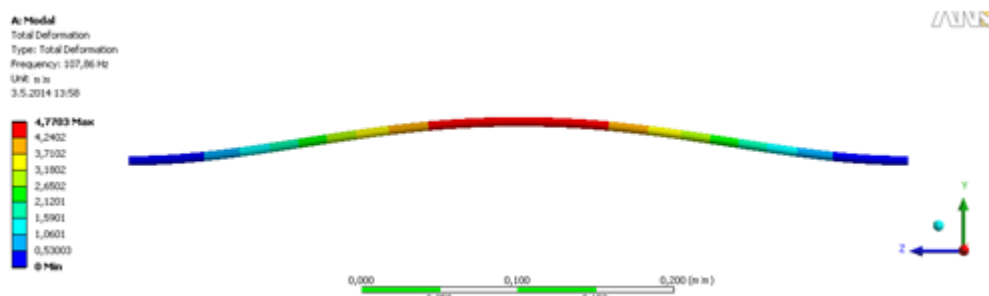
Graf 3 Vliv rychlosti pohybu jehly v závislosti na zdržení v úvratích

3.3.3 Modální analýza vlastních kmitů kolektoru

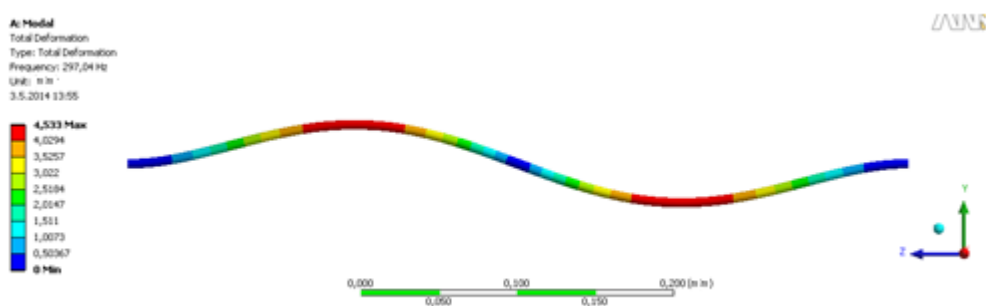
Při návrhu zařízení byla provedena modální analýza kolektoru. Jejím cílem je nalézt vlastní frekvence a tvary vlastních kmitů konstrukce a zjistit, zda se nachází v rozsahu provozních otáček a pokud ano, zda amplitudy nepředstavují riziko provozování zařízení.

Posouzení bylo provedeno pomocí simulace metodou konečných prvků. Pro simulaci byl použit program Ansys 13. Byly zvoleny shodné rozměry jako experimentálně používaný kolektor. Pomocí simulace byly hledány vlastní frekvence kolektoru. Ten byl pro zjednodušení uvažován jako upevněný na svých čelech. Síť byla tvořena elementy typu čtyřstěn o celkovém počtu 2130, počet uzlů byl 11541. Materiálem kolektoru byla nerezová ocel z knihovny materiálu programu. Výpočet byl

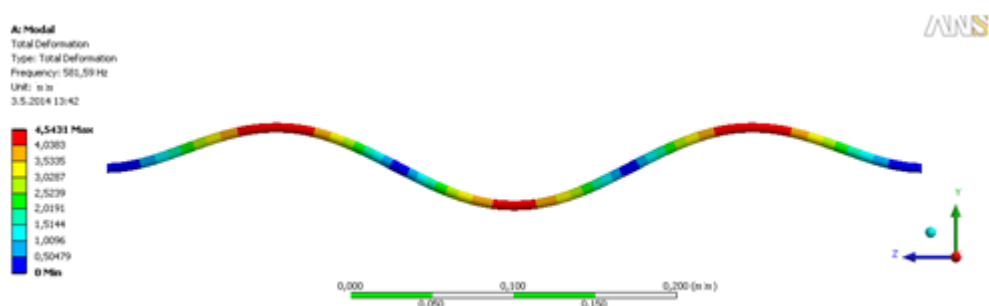
proveden pro prvních 6 vlastních frekvencí. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 1. Na obrázcích 33,34 a 35 jsou ukázány 2., 4. a 6. vlastní frekvence, tedy ty, které z obou blízkých vlastních frekvencí vykazují větší deformaci (amplitudu).



Obr. 33 – 1. vlastní tvar kolektoru



Obr. 34 – 2. vlastní frekvence kolektoru



Obr. 35 – 3. vlastní frekvence kolektoru

Pořadí vlastní frekvence	Frekvence [Hz]	Odpovídající otáčky [min^{-1}]	Skutečné otáčky [min^{-1}]	Amplituda [mm]	Počet kmiten/uzlů
1	107,82	6469,2	5200	4,7701	1/2
2	107,86	6471,6		4,7703	
3	296,93	17815,8	16 800	4,5329	2/3
4	297,04	17822,4		4,533	
5	581,38	34882,8	34000	4,5429	3/4
6	581,59	34895,4		4,5431	

Tab. 1 Výsledky počítačové simulace vlastních frekvencí kolektoru

Ověřování simulace bylo provedeno vizuálně přímo na zařízení pro získání orientovaných vláken. První vlastní tvar byl zaznamenán při otáčkách 5200 ot.min^{-1} (obr. 36) Druhý vlastní tvar nastal při otáčkách $16\,800 \text{ ot.min}^{-1}$. U nejvyšších otáček, tedy $34000 \text{ ot.min}^{-1}$ docházelo ke vzniku dalšího vlastního tvaru. Lze tvrdit, že hodnoty vlastních frekvencí ve skutečnosti byly o cca 1000 ot.min^{-1} nižší, nežli v případě simulace.



Obr. 36 1. vlastní tvar kolektoru

3.4 Orientace vláken

V následujících odstavcích bude popsán postup tvorby vzorků pro testování orientace nanovláken ve vrstvě. Dále pak postup získávání údajů pro vyhodnocení výsledků a samotné vyhodnocení orientace nanovláken v závislosti na vzdálenosti zvlákňovací jehly od kolektoru a různých otáčkách.

3.4.1 Výroba vzorků

K výrobě vzorků pro měření orientace vláken bylo jako podkladní sběrné vrstvy použito hliníkové folie. Folie byla připevněna na kolektor z důvodu složitosti snímání vzorků. Jako polymerní roztoky byly použity PVA, PCL a PUR. Pro každý ze tří roztoků byly vzorky vyráběny při vzdálenostech kolektoru od jehly 100 mm a 200 mm. Dalším proměnlivým faktorem byl počet otáček. Volené otáčky se pohybovaly v rozmezích od 3000 ot.min^{-1} do $25\,000 \text{ ot.min}^{-1}$. Otáčky byly kontrolovány pomocí ručního digitálního otáčkoměru Voltcraft DT-2 L/K. Posuv jehly byl zvolen tak, aby se

jehla pohybovala plynule a v úvrati stála co nejkratší dobu (cca 1 s). Tak bylo zajištěno rovnoměrné ukládání vrstvy.

Přívodní zdroj vysokého napětí na jehle byl nastaven na 11 kV u všech vybraných polymerních roztoků. Dávkování polymeru u PVA bylo zvoleno 2 ml.h^{-1} , u PCL a PUR 3 ml.h^{-1} . Každý vzorek byl vyráběn 10 min.

3.4.2 Obrazová analýza

Všechny zhotovené vzorky byly nejprve upevněny pomocí oboustranně lepicí pásky na terčíky. Terčíky s připevněnými vzorky byly vloženy do zlatičky a opatřeny vrstvou zlata o tloušťce 5 nm.

Takto připravené terčíky bylo možné vložit pod rastrovací elektronový mikroskop (SEM). Bylo použito mikroskopu od společnosti Tescan model VEGA 3 SB easyprobe. Z každého vzorku bylo vytvořeno několik snímků, pořízených při různých zvětšeních.

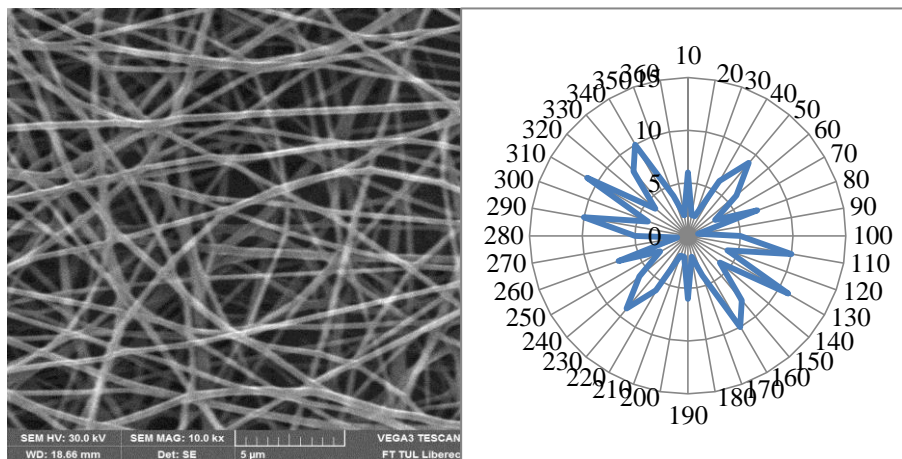
Snímky s určitým zvětšením (PVA 10000x, PCL a PUR 5000x) byly podrobeny obrazové analýze v programu NIS Elements. Byly sledovány odchylky úhlů od referenční přímky. Přímka byla zvolena rovnoběžně se směrem otáčení kolektoru. U každého vzorku proběhlo 100 měření.

3.4.3 Měření orientace

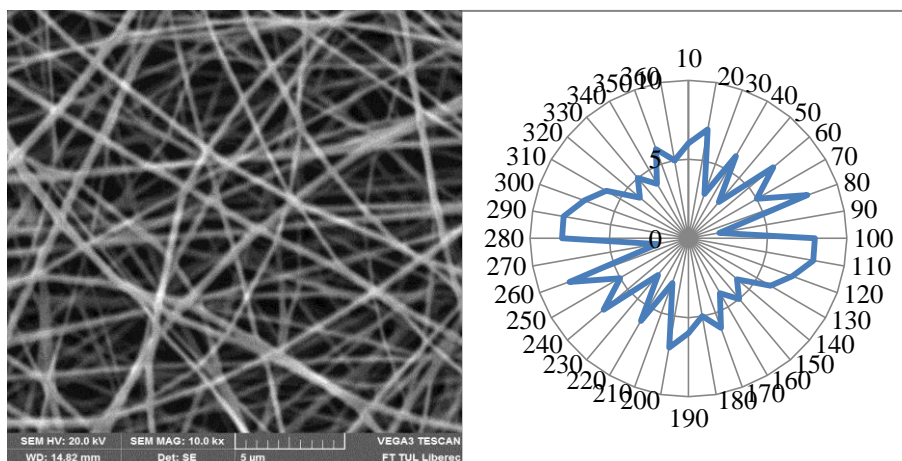
Ze získaných dat obrazové analýzy každého vzorku byly vytvořeny polární diagramy. Na nich můžeme pozorovat odlišnosti orientace jednotlivých vláken při různých otáčkách a vzdálenostech kolektoru. U vzorků, které prokazovaly převládající orientaci vláken v určitém směru, bylo vypočítáno procento urovnání. Toho bylo docíleno tak, že ke vláknům ve směru s největším zastoupením byla přičtena vlákna v rozmezí 15° na každou stranu. Počet vláken v této výseči (30°) vydělený celkovým počtem vláken nám dává procento urovnání. Porovnání jednotlivých materiálů při různých nastaveních jsou uvedeny v grafu 10. U jednotlivých materiálů budou uvedeny pouze vybrané ukázky SEM snímků a polárních diagramů. Všechny ostatní jsou pak k nalezení v příloze č. II. V příloze č. III jsou SEM snímky vrstev s menším zvětšením.

3.4.3.1 PVA vzorky

U vzorků z polyvinylalkoholu se nepodařilo vytvořit vrstvu, která by vykazovala orientaci vláken. Vzorky vyrobené ve vzdálenostech jehly od kolektoru 100 mm i 200 mm při všech zkoumaných otáčkách měly izotropně uspořádaná vlákna.



Vlevo obr. 37 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf 4 ukazující orientaci vláken



Vlevo obr. 38 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf 5 ukazující orientaci vláken

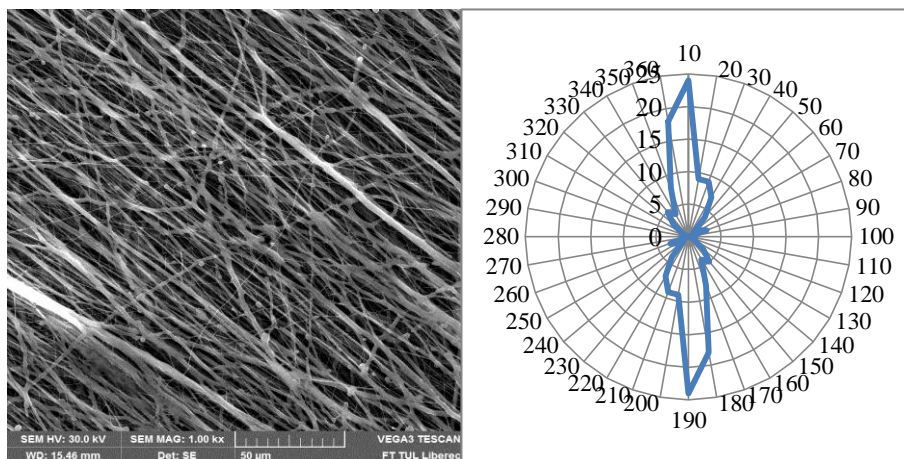
3.4.3.2 PCL vzorky

Vzorky polykaprolaktonu tvořené ve vzdálenostech 100 mm jehly od kolektoru vykazovaly určitou paralelitu od 5000 ot.min^{-1} . Se zvyšujícími se otáčkami rostla i orientace, avšak vždy zůstalo určité množství vláken neorientováno. Největšího

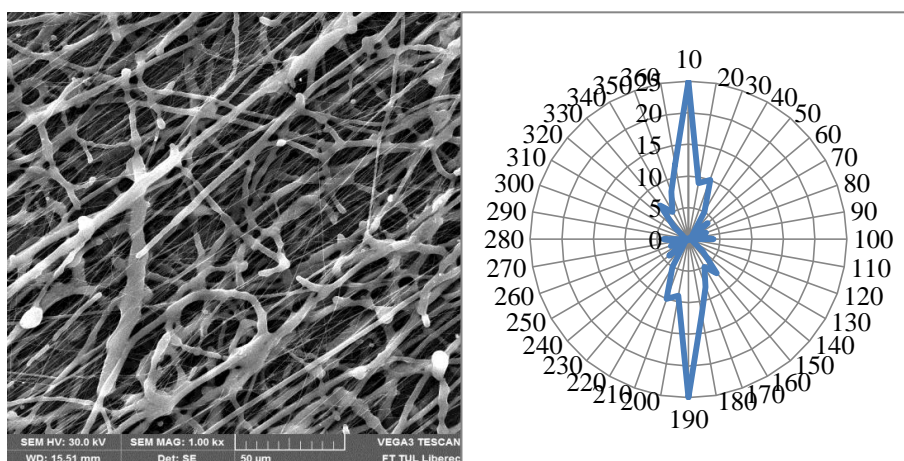
množství orientovaných vláken bylo dosaženo u vzorků vyrobených při rychlostech $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a $25000 \text{ ot.min}^{-1}$.

Ze vzorků vyráběných ve vzdálenostech 200 mm od kolektoru se začala vlákna urovnávat při rychlostech 7500 ot.min^{-1} až $15000 \text{ ot.min}^{-1}$. Při otáčkách $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ se orientace snížila.

Vlákna z PCL oproti vláknům z PVA dosahovala větších průměrů a byla rozteklá.



Vlevo obr. 39 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 1000x; vpravo graf 6 ukazující orientaci vláken



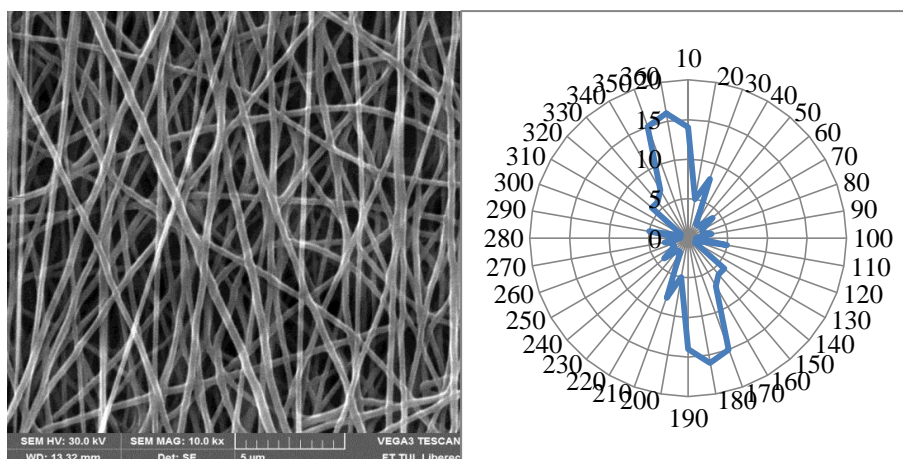
Vlevo obr. 40 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 1000x; vpravo graf 7 ukazující orientaci vláken

3.4.3.3 PUR vzorky

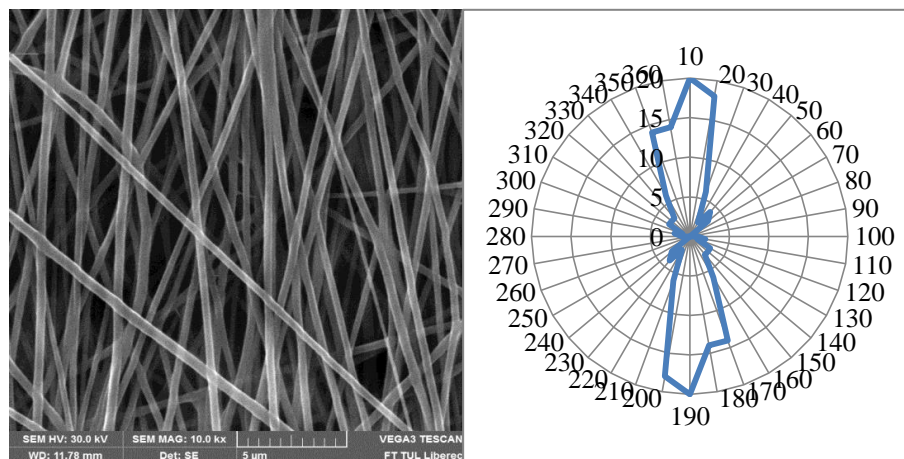
Polyuretanové vzorky vyráběné ve vzdálenosti jehly 100 mm nevykazovaly žádný náznak orientace při nejnižší volené rychlosti. K určité orientaci vláken došlo u otáček $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a $25000 \text{ ot.min}^{-1}$.

U vzorku vyrobeného ve vzdálenosti jehly 200 mm od kolektoru při minimálních otáčkách nebyl také žádný náznak orientace vláken. Stejně tak tomu bylo i u další zkoumané rychlosti 5000 ot.min^{-1} . Při rychlosti 7500 ot.min^{-1} však začíná docházet k určité orientaci vláken, která pokračuje až k nejvyšším zkoumaným otáčkám. Jako ideální se zdají být volené rychlosti $20\,000 \text{ ot.min}^{-1}$ a $25\,000 \text{ ot.min}^{-1}$. I zde určité množství vláken zůstalo neuspořádané, ale vrstva vyráběná v této vzdálenosti kolektoru od zvlákňovací jehly se zdála být lépe orientovaná.

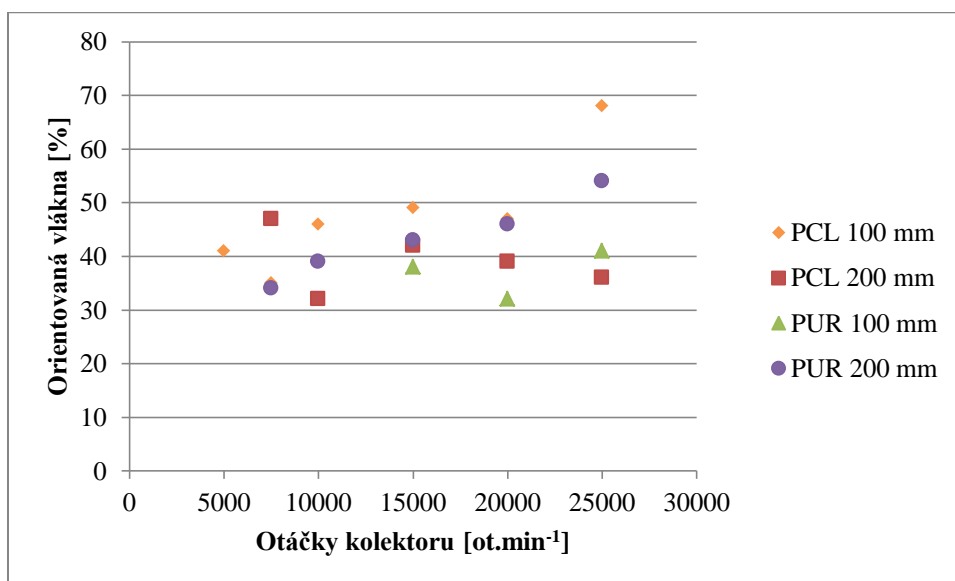
Ze zkoumaných PUR vzorků, můžeme vypořadovat, potřebu určité vzdálenosti jehly od kolektoru, aby se zvlákněný polymer stihl orientovat při nižších otáčkách a vznikla orientovaná vrstva.



Vlevo obr. 41 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf 8 ukazující orientaci vláken



Vlevo obr. 42 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf 9 ukazující orientaci vláken



Graf 10 Vliv otáček kolektoru na množství orientovaných vláken

3.5 Mechanické vlastnosti

V této kapitole bude popsán postup výroby vzorků pro testování mechanických vlastností a samotné testování, které probíhalo na trhacím zařízení.

3.5.1 Výroba vzorků

Vzorky pro zjišťování mechanických vlastností, byly zvlákňovány přímo na kolektor. Aby byla zajištěna schopnost manipulace se vzorky a možnost sejmutí nanovláknenné vrstvy, bylo třeba každý vzorek vyrábět 60 minut, a to i pro zajištění

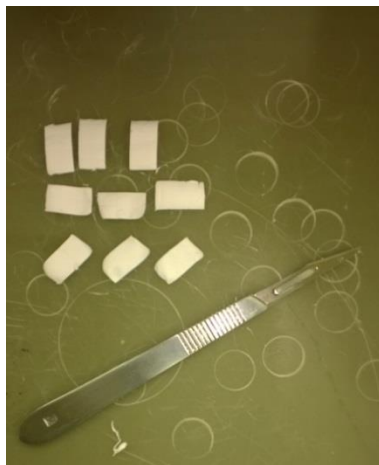
srovnatelnosti výsledků. Pro tento experiment byly zvoleny polymerní roztoky polykaprolaktonu a polyuretanu. Ty byly vhodné pro zvlákňování, protože vykazovaly schopnost orientace vláken. Byly vyráběny při třech různých rychlostech otáčení kolektoru, a to minimální 3000 ot.min⁻¹, 10000 ot.min⁻¹ a 20000 ot.min⁻¹. Pro všechny rychlosti otáčení byla použita vzdálenost kolektoru od hrotu zvlákňovací jehly 100 mm a 200 m. Dávkování PCL i PUR bylo zvoleno 3 ml.h⁻¹ při napětí 11 kV.

Po vyschnutí vzorků na tyčce byla nanovlákněná vrstva opatrně po délce rozříznuta skalpelem a sejmuta z kolektoru.

3.5.2 Příprava vzorků pro tahovou zkoušku

Z každé získané nanovlákněné vrstvy bylo třeba vyříznout skalpelem obdélník, a to ve třech odlišných směrech – radiálním (ve směru otáčení), axiálním (ve směru osy otáčení) a diagonálním. Velikost radiálního rozměru vyřezávaných vzorků byla omezena obvodem vzorku, který určoval průměr kolektoru. Ten byl ve všech případech 6 mm. Proto byl zvolen rozměr pro všechny vzorky 18 x 10 mm. Pro každý směr byly vytvořeny 3 vzorky. Vždy tedy vznikla sada 9 obdélníkových vzorků pro každou zkoumanou rychlost o dané vzdálenosti hrotu zvlákňovací jehly od kolektoru (obr. 43).

U všech vzorků byla zjištěna tloušťka pomocí digitálního tloušťkoměru. Hodnoty byly zaznamenány a dále použity při tahové zkoušce.



Obr. 43 Pohled na sadu vzorků pro tahovou zkoušku

3.5.3 Pevnostní zkouška

Všechny vzorky byly postupně upevněny do čelistí trhacího přístroje (obr. 44). Na připojeném počítači byla zpuštěna tahová zkouška. Čelisti se od sebe vzdalovaly rychlostí 4 mm za minutu. Vzorek byl namáhán tahem a zkouška byla přerušena ve chvíli, kdy došlo k jeho porušení.

Výstupem jsou grafy, hodnoty maximálních pevností F_{\max} , maximálních protažení A_{\max} a moduly pružnosti v tahu E . Hodnoty F_{\max} byly přepočítány na tloušťky jednotlivých vzorků, aby byla zajištěna porovnatelnost výsledků. Pro každý zkoušený vzorek byla před zpuštěním tahové zkoušky také vyplněna příslušná tloušťka a šířka, která představuje plochu průřezu vzorku před zpuštěním zkoušky.



Obr. 44 Trhací přístroj pro tahovou zkoušku

3.5.4 Vyhodnocení

Z dat pevnostních zkoušek bylo provedeno vyhodnocení. V tabulkách 2 až 13 jsou uvedeny průměrné hodnoty z naměřených dat jednotlivých zkoušek. V přílohách č. V jsou uvedeny veškerá naměřená data jednotlivých zkoušek. Vybrané tahové křivky jsou k dispozici v příloze č. IV.

3.5.4.1 PCL vzorky

Z výsledků je zřejmé, že pevnosti zjištěné v radiálním směru jsou vždy vyšší než pevnosti v axiálním a diagonálním směru. To vypovídá o skutečnosti, že vlákna jsou ukládána především ve směru otáčení kolektoru.

Samotná maximální síla F_{\max} však nemá dostatečnou vypovídací hodnotu. Je totiž nutno brát ohled na tloušťku a šířku vzorku, proto je maximální síla F_{\max}

přepočtena na tloušťku 1 milimetru. To zajistí vzájemnou porovnatelnost mezi jednotlivými vzorky různých tlouštěk. Dále je třeba se zaměřit i na hodnoty modulů pružnosti v tahu E a maximálních protažení vzorků, kterých je dosaženo. Vyšší hodnota modulu pružnosti ukazuje, že k dosažení stejné deformace je třeba vyššího napětí. U nižších hodnot modulů E pak můžeme většinou u jednotlivých zkoušek pozorovat vyšší hodnoty maximálních protažení vzorků, tedy deformace.

Zaměříme-li se na vzorky vyrobené při vzdálenosti kolektoru 100 mm, zjistíme, že nejvyšší pevnost v radiálním směru dosahuje vzorek vyrobený při otáčkách 10000 ot.min⁻¹ - průměrně 1,29 MPa. Zde byl zjištěn i nejvyšší modul pružnosti v tahu E – 4,74 MPa. Nejnižší pevnost vykazuje vzorek vyrobený při minimální rychlosti 3000 ot.min⁻¹, průměrně 0,66 MPa. Modul E dosáhl průměrné hodnoty 2,38 MPa. Nejvyšší orientaci vláken vykazoval vzorek vyrobený při nejvyšších rychlostech, očekávalo by se tedy, že i pevnost radiálním směru bude nejvyšší. Při zkoušce však k tomuto jevu nedošlo a průměrná pevnost vzorku při 20000 ot.min⁻¹ dosáhla 1,02 MPa. Modul E zde byl nejnižší – 1,03 MPa, což zde souviselo s vyšší průměrnou hodnotou maximálního protažení A_{\max} 27,5 %.

Směr testování vzorku - radiální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
100 mm / 3000 ot.min ⁻¹	24,83	2,61	6,61	2,38	0,66
100 mm / 10000 ot.min ⁻¹	21,59	4,19	12,79	4,74	1,29
100 mm / 20000 ot.min ⁻¹	27,5	4,72	10,20	1,03	1,02

Tab. 2 Průměrné naměřené hodnoty PCL vzorků v radiálním směru

Axiální pevnosti vzorků byly vždy výrazně nižší, než pevnosti radiální. U vzorku v axiálním směru výroby je pouze menší množství vláken namáháno tahem. Větší množství vláken není uchyceno v čelistech, proto je při tahové zkoušce namáháno malé množství vláken. Vzorky vyrobené při minimální rychlosti dosahovaly poloviční pevnosti oproti radiálním, průměrně 0,35 MPa. Otáčky 10000 ot.min⁻¹ a 20000 ot.min⁻¹ dosahovaly pevnosti výrazně nižší a pevnost se s otáčkami snižovala. Při maximální rychlosti až na 0,04 MPa. Takový pokles byl vzhledem k orientaci vláken očekáván. Moduly tažnosti se s otáčkami snižovaly – při

minimálních otáčkách dosáhl modul E průměrné hodnoty 1,63 MPa. Při maximální rychlosti byl modul E 0,09 MPa.

Směr testování vzorku - axiální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
100 mm / 3000 ot.min ⁻¹	33,06	1,42	3,56	1,63	0,35
100 mm / 10000 ot.min ⁻¹	20,39	0,46	1,44	0,75	0,14
100 mm / 20000 ot.min ⁻¹	33,59	0,20	0,44	0,09	0,04

Tab. 3 Průměrné naměřené hodnoty PCL vzorků v axiálním směru

Diagonální pevnosti vzorků vyráběných při vzdálenostech 100 mm vykazují číselně srovnatelnou pevnost s pevností axiální. I zde docházelo ke snižování pevnosti s vyšší rychlostí vyrábění vzorků. Nejvyššího modulu pružnosti v tahu bylo dosaženo u vzorku vyrobeného při 10000 ot.min⁻¹, průměrně 1,42 MPa. U tohoto vzorku byla menší průměrná maximální tažnost, a to 12,18 %.

Směr testování vzorku - diagonální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
100 mm / 3000 ot.min ⁻¹	21,35	1,31	3,33	1,32	0,33
100 mm / 10000 ot.min ⁻¹	12,18	0,53	1,74	1,42	0,17
100 mm / 20000 ot.min ⁻¹	27,67	0,26	0,57	0,15	0,06

Tab. 4 Průměrné naměřené hodnoty PCL vzorků v diagonálním směru

U vzorků vyrobených při vzdálenosti 200 mm od kolektoru je vždy vyšší pevnost v radiálním směru. Z tohoto pohledu měl nejvyšší pevnost vzorek vyrobený při minimálních otáčkách, v průměru 0,69 MPa. Nejnížší pevnost měl vzorek zvlákněný při rychlosti 10000 ot.min⁻¹, v průměru 0,49 MPa, byl zde však nejvyšší modul E, a to 0,75 MPa.

Směr testování vzorku - radiální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
200 mm / 3000 ot.min ⁻¹	25,52	1,35	6,90	0,63	0,69
200 mm / 10000 ot.min ⁻¹	21,14	1,02	4,94	0,75	0,49
200 mm / 20000 ot.min ⁻¹	15,76	0,84	6,00	0,98	0,6

Tab. 5 Průměrné naměřené hodnoty PCL vzorků v radiálním směru

Axiální pevnosti vzorků vyrobených při různých otáčkách tentokrát neprokazovaly příliš velké rozdíly, jako tomu bylo u vzdálenosti 100 mm. Nejvyšší pevnost 0,14 MPa byla zjištěna u vzorku vyrobeného u nejnižších otáček. Vzorky vyrobené při rychlostech 10000 ot.min⁻¹ a 20000 ot.min⁻¹ vykazovaly oba pevnost 0,09 MPa. V této kategorii měl nejvyšší modul pružnosti E vzorek vyrobený při rychlosti 10000 ot.min⁻¹, průměrně 0,20 MPa.

Směr testování vzorku - axiální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
200 mm / 3000 ot.min ⁻¹	45,47	0,23	1,35	0,16	0,14
200 mm / 10000 ot.min ⁻¹	29,42	0,68	0,88	0,20	0,09
200 mm / 20000 ot.min ⁻¹	30,69	0,12	0,87	0,06	0,09

Tab. 6 Průměrné naměřené hodnoty PCL vzorků v axiálním směru

Diagonální pevnosti byly téměř identické s pevnostmi axiálními. Výjimka byla pouze u vzorku zvlákněného při minimálních otáčkách. Zde byla naměřena průměrná pevnost i modul E vyšší – maximální pevnost 0,23 MPa a modul E 0,50 MPa.

Směr testování vzorku - diagonální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
200 mm / 3000 ot.min ⁻¹	21,40	0,47	2,26	0,50	0,23
200 mm / 10000 ot.min ⁻¹	20,02	0,19	0,90	0,13	0,09
200 mm / 20000 ot.min ⁻¹	15,66	0,14	1,00	0,26	0,1

Tab. 7 Průměrné naměřené hodnoty PCL vzorků v diagonálním směru

3.5.4.2 PUR vzorky

Vzorky vyrobené při vzdálenosti 100 mm zvlákňovací jehly od kolektoru v radiálním směru zkoušení vykazovaly stoupající pevnost s rostoucími otáčkami. Zatímco u minimální rychlosti byla naměřena průměrná pevnost 2,24 MPa, u rychlosti 20000 ot.min⁻¹ pevnost dosáhla 8,03 MPa, maximální protažení činilo 164,28 % a modul pružnosti v tahu 7,18 MPa. Stoupající pevnost je v souladu s orientací vláken ve vrstvě, kde k orientaci dochází právě u vyšších otáček.

Směr testování vzorku - radiální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
100 mm / 3000 ot.min ⁻¹	135,11	1,21	20,16	4,54	2,24
100 mm / 10000 ot.min ⁻¹	161,98	2,42	40,39	4,17	4,15
100 mm / 20000 ot.min ⁻¹	164,28	4,82	79,65	7,18	8,03

Tab. 8 Průměrné naměřené hodnoty PUR vzorků v radiálním směru

Nejvyšší pevnost v axiálním směru byla naměřena u vzorku vyrobeného při minimálních otáčkách, v průměru 3,47 MPa. Při této rychlosti byla tvořena izotropní nanovlákněná vrstva, proto je pevnost podobná ve všech zkoumaných směrech. V axiálním směru dokonce vyšší. Zde bylo naměřeno i nejvyšší maximální protažení 171,87 % a modul pružnosti v tahu 5,45 MPa. Nejnižší pevnost byla zjištěna u vzorku vyrobeného při 10000 ot.min⁻¹, a to 1,48 MPa.

Směr testování vzorku - axiální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
100 mm / 3000 ot.min ⁻¹	171,87	2,03	32,54	5,45	3,47
100 mm / 10000 ot.min ⁻¹	126,53	0,76	14,23	2,47	1,48
100 mm / 20000 ot.min ⁻¹	166,02	1,02	16,35	1,84	1,63

Tab. 9 Průměrné naměřené hodnoty PUR vzorků v axiálním směru

Podobný průběh jako vzorky zkoušené v axiálním směru vykazovaly i vzorky zkoušené diagonálně. Nejvyšší pevnost 2,54 MPa byla tedy u vzorku vyrobeného při minimálních otáčkách. Průměrná zjištěná hodnota maximálního protažení u tohoto vzorku činí 174,79 %.

Směr testování vzorku - diagonální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
100 mm / 3000 ot.min ⁻¹	174,79	1,6	24,26	3,52	2,54
100 mm / 10000 ot.min ⁻¹	112,04	0,88	17,60	3,06	1,75
100 mm / 20000 ot.min ⁻¹	123,3	1	16,69	2,24	2,05

Tab. 10 Průměrné naměřené hodnoty PUR vzorků v diagonálním směru

Vzorky vyráběné při vzdálenosti 200 mm zvlákňovací jehly od kolektoru v radiálním směru zcela neprokázaly předpokládané vlastnosti. Nejvyšší průměrná pevnost 3,37 MPa byla naměřena u vzorku zvlákněného při 20000 ot.min⁻¹. Maximální protažení zde bylo naměřeno mnohem nižší, 58,30 % a modul pružnosti v tahu 2,70 MPa. Oproti vzorku zvlákněného při vzdálenosti 100 mm je však pevnost nižší. Nejnižší průměrnou pevnost vykazoval vzorek vyrobený při rychlosti 10000 ot.min⁻¹ - 2,47 MPa. Zde byla naměřena tažnost 85,94 % a modul pružnosti 4,4 MPa.

Směr testování vzorku - radiální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
200 mm / 3000 ot.min ⁻¹	159,90	0,80	26,84	3,10	2,68
200 mm / 10000 ot.min ⁻¹	85,94	0,49	24,67	4,40	2,47
200 mm / 20000 ot.min ⁻¹	58,30	0,71	31,78	2,70	3,27

Tab. 11 Průměrné naměřené hodnoty PUR vzorků v radiálním směru

Axiálně testované vzorky vyrobené při vzdálenosti 200 mm zvlákňovací jehly od kolektoru dosáhly nižších pevností, než tomu bylo u radiálního směru. U nejnižších otáček byla zjištěna nejvyšší průměrná pevnost 2,83 MPa. Maximální protažení vzorku zde dosáhlo 116,95 % a modul pružnosti 4,02 MPa. Pevnost vzorků se zvyšujícími se otáčkami klesala a dosáhla poměrně nízkých hodnot. Při 20000 ot.min⁻¹ byla zjištěna průměrná pevnost vzorku 0,47 MPa, maximální protažení 81,56 % a modul pružnosti 0,51 MPa.

Směr testování vzorku - axiální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
200 mm / 3000 ot.min ⁻¹	116,95	0,81	26,84	4,02	2,83
200 mm / 10000 ot.min ⁻¹	76,31	0,18	7,67	0,33	0,58
200 mm / 20000 ot.min ⁻¹	81,56	0,09	3,11	0,51	0,47

Tab. 12 Průměrné naměřené hodnoty PUR vzorků v axiálním směru

U diagonálně testovaných vzorů vyrobených při vzdálenosti 200 mm dosáhl nejvyšší pevnosti vzorek zvlákněný při minimálních otáčkách. Pevnost u tohoto vzorku byla dokonce ze všech směrů testování nejvyšší, a to 3,12 MPa. Vzorek také dosáhl vysokého maximálního protažení v průměru 166,70 % a modulu pružnosti 1,74 MPa. Hodnota pevností klesá se zvyšujícími se otáčkami. U otáček 10000 ot.min⁻¹ a 20000 ot.min⁻¹ jsou průměrné hodnoty pevností a moduly pružnosti podobné. Při nejvyšší zkoušené rychlosti byla zjištěna hodnota pevnosti 1,12 MPa, modul pružnosti 0,71 MPa. Hodnota maximálního protažení zde však byla nižší, a to 56,21 %.

Směr testování vzorku - diagonální					
Vzdálenost kolektoru / Otáčky kolektoru	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
200 mm / 3000 ot.min ⁻¹	166,70	0,81	26,89	1,74	3,12
200 mm / 10000 ot.min ⁻¹	108,11	0,25	8,22	0,77	1,22
200 mm / 20000 ot.min ⁻¹	56,21	0,19	7,22	0,71	1,12

Tab. 13 Průměrné naměřené hodnoty PUR vzorků v diagonálním směru

Nejvyšších pevností ze všech polyuretanových vzorků bylo dosaženo u vzorku vyrobeného při otáčkách 20000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru.

4 Diskuze výsledků

Stanovení otáček kolektoru

Z naměřených závislostí je zřejmé, že otáčky bez kolektoru jsou o něco vyšší v porovnání se situací, kdy je kolektor použit. To je dáno tím, že přidaná hmota ve formě kolektoru představuje pro pohon určitou zátěž. Je proto třeba tento fakt při provozu zohlednit. V případě použití kolektoru z jiného materiálu (kompozity, plasty, slitiny lehkých kovů) nebo s jinou geometrií (stupňovitý, dutý, jiného průměru), je nutné provést verifikace nastavených a skutečných otáček. Taktéž je třeba zmínit, že jistou roli hraje i způsob nastavení otáček, kdy je třeba dodržet smysl jejich změny. Tzn. otáčky buď pouze zvyšovat z minimální na maximální hodnotu, nebo naopak a k tomu použít i příslušnou kalibrační křivku. Při nedodržení této zásady může být rozdíl mezi nastavenými a požadovanými otáčkami až několik tisíc. Příčinou je nejspíše nasazení regulačního kolečka se stupnicí na regulační prvek s jistou vůlí.

Rychlost posuvu jehly

Výsledky ukazují, že maximální a minimální rychlost posuvu jehly je pro praktické použití nevhodná. Důvody jsou následující: při příliš vysoké rychlosti posuvu dochází k značnému přesahu konstrukce pro vložení jehly vzhledem ke koncovým spínačům, při příliš nízké rychlosti je doba zdržení v úvratích dlouhá a může přesáhnout dobu, po kterou se nosič jehly mezi úvratěmi pohybuje. To pak vede k odlišnému množství zvlákněného materiálu v podélném směru útvaru. Sílu posuvu určuje tlak vzduchu, zatímco rychlost posuvu určuje průtok, který je však při malých rychlostech nedostačující pro přesunutí ventilu ovládajícího směr posuvu do požadované polohy. Důsledkem je značné zdržení v úvratích. Tyto problémy jsou dány vlastnostmi použitého lineárního pohonu, který je navržen pro průmyslové použití, při kterém se nepoužívají nízké rychlosti a posuvy na malé vzdálenosti. Přesahy pak nepředstavují problém. Doporučuje se tedy nepoužívat krajních hodnot rychlostí posuvu a v případě maximálních rychlostí volit polohu koncových spínačů tak, aby nosič jehly nemohl v důsledku setrvačnosti narazit do pevné části konstrukce.

Modální analýza vlastních kmitů kolektoru

Pomocí simulace byly stanoveny vlastní frekvence kolektoru viz tab. 1. Simulace vycházela z reálné geometrie a materiálových vlastností kolektoru. Bylo zjištěno, že hodnoty vlastních frekvencí se nachází v oblasti pracovních otáček kolektoru a je proto nutno se jimi zabývat. Experimentálně byly zjištěny skutečné hodnoty těchto frekvencí a bylo konstatováno, že oproti simulaci jsou tyto hodnoty přibližně o 1000 ot.min^{-1} nižší. Příčinou rozdílu mohou být jiné okrajové podmínky, než které ve skutečnosti nastaly (možnost posuvu ložiska na kolektoru, excentricita kolektoru apod.). Hodnoty amplitudy výkmitu kolektoru nebyly měřeny, ale lze říci, že zhruba odpovídaly výsledkům simulace. Vzhledem k hodnotě amplitudy je doporučeno se oblasti otáček, při kterých dochází ke vzniku kmitání vyvarovat.

Je však zřejmé, že hodnoty vlastních frekvencí získané oběma způsoby jsou poměrně blízké a metody simulace lze tedy použít, například pro určení vlastních frekvencí v budoucnu používaných kolektorů jiného typu.

Orientace vláken

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.4.3.1, vzorky PVA nevykazují orientaci, a to ani při nejvyšších otáčkách kolektoru. Příčiny mohou být následující: rychlost pohybu vláken od jehly ke kolektoru je zřejmě vyšší nežli úhlová rychlost kolektoru a vlákna se proto neorientují. Řešením by mohlo být zvětšení úhlové rychlosti např. zvýšením otáček kolektoru nebo použitím kolektoru o větším průměru. V prvním případě to není možné z důvodu dosažení maximálních otáček použitého pohonu. V druhém případě hrozí riziko značného kmitání kolektoru. Druhá příčina může spočívat ve zbytkovém náboji na PVA vláknech v okamžiku přiblížení se ke kolektoru, přičemž tento zbytkový náboj způsobí vlivem odpudivých sil izotropní uložení vláken. Další zvyšování vzdálenosti kolektoru, při kterém by mohlo dojít k poklesu náboje, již není proveditelné. Důvodem je nutnost zvyšování elektrického potenciálu, který by však způsoboval výboj mezi jehlou a pevnou částí konstrukce zařízení.

Vzorky PCL vykazovaly určitou schopnost orientace již při nižších otáčkách. Pro výrobu orientovaných vrstev z PCL je tedy možné použít nižší otáčky kolektoru a vzdálenost mezi zvlákňovací jehlou a kolektorem nastavit tak, aby kvalita vznikající vrstvy byla pokud možno co nejvyšší.

V případě PUR vzorků bylo dosaženo orientace při vyšších otáčkách, a to i v závislosti na vzdálenosti jehly od kolektoru. Lze konstatovat, že chceme-li

dosáhnout orientace s nižšími otáčkami, je nutné zvýšit vzdálenost mezi jehlou a kolektorem a naopak.

Z pohledu produktivity zvlákňovacího procesu se jeví jako nejvhodnější polymer PCL. Tento polymer vykazuje také nejsnadnější orientovatelnost. Nevýhodou je tendence k degradaci vláken po dopadu na kolektor, která se jeví jako rozpouštění vlákna zbytkovým množstvím rozpouštědla. Vrstvy také vykazují velké množství hrubých vláken (mikrovláken). Vrstvy obsahovaly poměrně velké množství defektů, především kapek. Polymer PVA je z pohledu orientovatelnosti prakticky nepoužitelný. K orientaci by bylo nutné zajistit jiných podmínek, které jsou v současném stavu konstrukce nedosažitelné. Vrstva však nevykazovala defekty. Polyuretan se zvlákňoval poměrně snadno s vysokou produktivitou. Pro získání vyšší orientace je však nutno nastavit vyšší otáčky kolektoru a jeho vzdálenost od zvlákňovací jehly. Taktéž je nutné volit takové materiály, které nedegradují v kontaktu s polyuretanovým roztokem.

Mechanické vlastnosti

Výsledky mechanických vlastností polykaprolaktonových vzorků ukazují vyšší pevnosti v radiálním směru, tedy ve směru, ve kterém je očekávána určitá orientace vláken ve vrstvě. Vzorek vyrobený při 100mm vzdálenosti zvlákňovací jehly od kolektoru vykazoval v radiálním směru nejvyšší pevnosti při 10000 ot.min⁻¹. Podle schopnosti urovnávání vláken by se dalo očekávat, že bude pevnost nejvyšší při vyšších otáčkách. U axiálních pevností došlo se zvyšujícími otáčkami k poklesům pevností i modulů pružnosti. Vzorky byly v axiálním směru také více tažné. Důvodem je menší množství vláken uložených v tomto směru namáhání. U diagonálně zkoušených vzorků nelze přímo odhadovat konkrétní hodnoty. Výsledky však ukazují, že pevnosti jsou podobné jako pevnosti v axiálním směru, s rozdílem vyšších hodnot modulů u vyšších otáček a menších hodnot tažnosti.

Hodnoty pevností polykaprolaktonových vzorků vyrobených ve vzdálenosti 200 mm hrotu zvlákňovací jehly od kolektoru obecně ukazují nižší hodnoty pevností. V radiálním směru zde nastal dokonce jev, kdy byla neměřena nejvyšší hodnota pevnosti u nejnižších otáček. Modul pružnosti se zde s otáčkami zvyšoval a naopak tažnosti se zde s růstem otáček snižovaly. Axiální pevnosti dosahovaly nízkých hodnot a příliš se nelišily. Moduly pružnosti nevykazovaly klesající charakter, nejnižší hodnota však byla naměřena u vzorku vyrobeného při 20000 ot.min⁻¹. Vzorky v tomto směru vykazovaly vyšších hodnot protažení, které u minimálních otáček dosáhly až 45%.

V diagonálním směru vzorky nevykazovaly postupný pokles pevnosti. Vzorek vyrobený při nejnižší rychlosti kolektoru měl nejvyšší pevnost, stejně jako modul pružnosti. Z výsledků je patrné, že vzorky zvlákněné při vzdálenostech 100 mm dosáhly vyšších pevností, ale ne vždy je patrná závislost orientace vláken ve vrstvě s růstem otáček kolektoru. To dokazují zejména moduly pružnosti v tahu, které ne vždy vykazují závislost. Při vzdálenostech 200 mm zvláknovací jehly od kolektoru bylo dosaženo nižších pevností i modulů. Ani zde se vždy nepodařilo prokázat závislost. Důvodem může být nerovnoměrné ukládání vláken ve vrstvě či defekty, které byly u vzorků vyrobených z polykaprolaktonu přítomny.

Z výsledků testování mechanických vlastností polyuretanových vzorků je zřejmé, že vyšších hodnot pevností i modulů pružnosti v tahu bylo dosaženo při použití vzdálenosti zvláknovací jehly od kolektoru 100 mm. V radiálním směru testování bylo u vzorku vyrobeného při $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ dosaženo průměrné hodnoty pevnosti 8,03 MPa a modulu pružnosti 7,18 MPa při vysoké hodnotě tažnosti 164,28 %, která zde byla nejvyšší. Očekávalo by se, že se tažnost bude snižovat, ale došlo k opačnému jevu. Protože se u nejnižších použitých otáček tvořila izotropní vrstva, hodnoty pevností ve všech třech směrech dosahují podobných hodnot, v axiálním směru dokonce o něco vyšší. V radiálnímu směru při minimálních otáčkách byla naměřena nižší tažnost, a to 135,11%. V axiálním směru testování nedošlo k postupnému poklesu pevností, ačkoliv oproti vzorku vyrobenému při minimálních otáčkách bylo při vyšších dosaženo cca polovičních hodnot. Moduly pružnosti v axiálním směru měly klesající charakter. Ke stejnému jevu došlo i ve směru diagonálním.

U vzorků vyrobených při vzdálenostech 200 mm zvláknovací jehly od kolektoru bylo dosaženo v radiálním směru nejvyšší pevnosti u vzorku vytvořeného při $20000 \text{ ot.min}^{-1}$. Nedošlo však k postupnému nárůstu pevnosti s otáčkami a hodnoty se od sebe neliší tolik, jako tomu bylo u vzdálenosti 100 mm. Pokud porovnáme nejvyšší hodnoty pevnosti v radiálním směru, zjistíme, že se liší o 4,8 MPa. Tažnost se v tomto směru se zvyšujícími se otáčkami snižovala. V axiálním směru došlo se zvýšením otáček ke snižování pevnosti. Neorientovaná vrstva vyrobená při minimálních otáčkách v axiálním směru dosahovala o něco vyšší pevnosti i modulu pružnosti, ale nižší tažnosti. Diagonální vzorky vykazovaly všechny hodnoty klesající se zvyšujícími se otáčkami.

Vzorky polyuretanu ve srovnání s polykaprolaktonem vykazovaly vyšší hodnoty pevností v tahu i modulů pružnosti v tahu.

Z výsledků není vždy zcela jasná závislost zvyšování pevnosti s nárůstem otáček. U některých vzorků došlo k neočekávanému vybočení hodnot. Je mnoho důvodů, proč k tomuto jevu mohlo dojít. Proces zvlákňování není stabilní a je ovlivňován celou řadou faktorů, jako jsou například proudění vzduchu nebo teplota okolí. Ačkoliv byla snaha co nejlépe napodobit podmínky při přípravě všech vzorků, mohlo dojít k nerovnoměrnému uspořádání vláken v celé vrstvě nebo se mohl počet vláken lišit a mohly též vzniknout i určité defekty ve vrstvě. Samotné měření u tak malých tloušťek vrstev také není zcela přesné. Je však patrné, že pevnosti v tahu i moduly pružnosti v radiálním směru vykazují vyšších hodnot než ve směru axiálním. Lze tedy tvrdit, že zařízení pro výrobu tubulárních prvků při použití vyšších otáček přednostně orientuje vlákna ve směru otáčení.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou tvorby orientovaných nanovláknenných vrstev, které otevírají celou řadu nových možností a aplikací. Nejprve byly představeny jednotlivé metody pro přípravu nanovláken. Podrobněji se práce věnuje elektrostatickému zvlákňování, vlivům, které ho mohou ovlivnit a možnostmi příprav orientovaných vrstev a svazků nanovláken.

Pro tvorbu orientovaných vrstev bylo navrženo zařízení pro tvorbu tubulárních prvků, které je v práci popsáno. V experimentální části bylo potřeba před samotnou výrobou vzorků stanovit určité parametry, jako otáčky kolektoru či rychlost posuvu zvlákňovací jehly, protože tyto hodnoty nebyly známy.

Na třech vybraných polymerních roztocích, konkrétně polyvinylalkoholu, polykaprolaktonu a polyuretanu byl sledován vliv vzdálenosti zvlákňovací jehly od kolektoru a různého počtu otáček na orientaci nanovláken ve vzniklé vrstvě. Na snímcích pořízených elektronovým rastrovacím mikroskopem byly pomocí obrazové analýzy měřeny úhly uložení vláken ve vrstvě. Ze získaných údajů byly vytvořeny polární diagramy.

Bylo zjištěno odlišné chování polymerů při tvorbě vrstev. Z polyvinylalkoholu se nepodařilo vytvořit orientovanou vrstvu při žádném z nastavení. Polykaprolakton vykazoval schopnost urovnání vláken při nižších otáčkách, než tomu bylo u polyuretanu. Při vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru začal vykazovat určitou orientaci již při 5000 ot.min^{-1} . Nevýhodou PCL však byla nízká kvalita vzniklých vláken. Polyuretan projevil schopnost urovnání až při vyšších otáčkách.

Na polymerech, které prokázaly schopnost určité orientace, tedy na polykaprolaktonu a polyuretanu, byly zkoušeny mechanické vlastnosti. Vzorky byly podrobeny tahové zkoušce ve třech různých směrech výroby vzorků – radiálním, axiálním a diagonálním. Byly sledovány maximální pevnosti, moduly pružnosti v tahu a protažení.

U vzorků se ne vždy projevila závislost mezi pevnostmi, moduly pružnosti v tahu a tažnostmi na počtu použitých otáček či vzdálenosti jehly od kolektoru. Bylo však patrné, že v radiálních směrech, tedy ve směrech očekávaného ukládání vláken, bylo dosahováno vyšších hodnot pevností.

Výsledky experimentu by v budoucnu mohly usnadnit manipulaci se zařízením, protože jeho parametry zatím nebyly přesně popsány. Dále by měly usnadnit vhodnou

volbu parametrů přístroje (otáčky kolektoru, vzdálenost zvláknovací jehly od kolektoru)
pro testované polymerní roztoky.

LITERATURA

- [1] BROWN, P.J. a STEVENS, K. Nanofibers and nanotechnology in textiles. Cambridge: Woodhead Publishing, in association with The Textile Institute, 2007. ISBN 978-184-5691-059.
- [2] RAMAKRISHNA, Seeram. An introduction to electrospinning and nanofibers. Hackensack, NJ: World Scientific, 2005, 382 s. ISBN 98-125-6454-3.
- [3] Přednášky: Textilní nanomateriály. [online]. 2014. Dostupné z http://www.ft.tul.cz/depart/knt/web/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=44&Itemid=36
- [4] Chemické listy: Bezpečná nanovlákná [online]. Praha: Česká společnost chemická, 2009, č.103 [cit. 2014-11-20]. ISSN 0009-2770. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2009_12_1009-1016.pdf
- [5] A&L Simonyan German Engineering [online]. © 2006- 2014. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.simonyan-company.com/en/products/complete-plants-for-the-artificial-and-synthetic-fibres-industry/meltblown-process/>
- [6] Hills, Inc. [online]. [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.hillsinc.net/articles/Polymeric.htm>
- [7] FibeRio® Technology Corporation. [online]. © 2011. [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: www.fiberiotech.com/technology/how-it-works/
- [8] HUANG, Z. M., ZHANG, Y. Z., KOTAKI, M., a RAMAKRISHNA, S. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. Composites Science and Technology. Oxford: Elsevier, 2003, Volume 63, Issue 15, Pages 2223–2253. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00178-7
- [9] ZHOU, F.L., GONG, R.H., a PORAT, I. Needle and Needleless Electrospinning for Nanofibers. Journal of Applied Polymer Science. 2010, Volume 115, Issue 5, Pages 2591–2598. DOI: 10.1002/app.31282
- [10] BROWN, P.J. a STEVENS, K. Nanofibers and nanotechnology in textiles. Cambridge: Woodhead Publishing, in association with The Textile Institute, 2007. ISBN 978-184-5691-059.
- [11] HAGHI, A. K. Electrospinning of nanofibers in textiles. Toronto: Apple Academic Press, 2012. ISBN 978-192-6895-048.

- [12] YARIN, A.L. a ZUSSMAN E. Upward needleless electrospinning of multiple nanofibers. *Polymer*. 2004, Volume 45, Issue 9, Pages 2977–2980. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.02.066
- [13] LIU, Y., HE, J. H. a YU J. Y. Bubble-electrospinning: a novel method for making nanofibers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008, Volume 96. DOI: 10.1088/1742-6596/96/1/012001.
- [14] Universiteit van Stellenbosch. [online]. 2011 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://blogs.sun.ac.za/news/2011/12/06/msc-student-contributes-to-research-on-bubble-technique-to-spin-nanofibres/>
- [15] WANG, X., NIU, H., TONG, L. a WANG, X. Needleless electrospinning of nanofibers with a conical wire coil. *Polymer Engineering & Science*. 2009, volume 49, issue 8, Pages 1582–1586. DOI: 10.1002/pen.21377
- [16] WANG, X., NIU, H., WANG, X. a LIN T. Needleless Electrospinning of Uniform Nanofibers Using Spiral Coil Spinnerets. *Journal of Nanomaterials*. 2012, Pages 71-82. DOI: 10.1155/2012/785920
- [17] Elmarco: Technologie Nanospider™ společnosti Elmarco. [online]. 2010 [cit. 2014-11-23]. Dostupné z: http://japatech.zelenausporam.cz/gallery/0/30-5_technologie_nanospider_spolecnosti_elamrco_stanislav_petrik.pdf
- [18] Hindawi: Scheme of electrospinning setup - “Nanospider”. [online]. [cit. 2014 -11-23]. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/amse/2013/932636/fig2/>
- [19] Yflow - Nanotechnology Solutions: Coaxial Electrospray & Electrospinning: Microencapsulation. [online]. [cit.2014-11-23]. Dostupné z: <http://www.yflow.com/coaxial-electrospinning-electrospray-microencapsulation/>
- [20] LI, Z. a WANG C. One-dimensional nanostructures. New York: Springer, 2013, 141 pages. ISBN 978-364-2364-266.
- [21] ANDRADY, A. L. Science and technology of polymer nanofibers. Hoboken, N.J.: Wiley, 2008, 403 s. ISBN 04-717-9059-1.
- [22] LIN, Tong. Nanofibers - Production, Properties and Functional Applications. InTech, 2011, 468 pages. ISBN 978-953-307-420-7.
- [23] BORNAT, A. Production of electrostatically spun products [patent]. US4689186 A. Uděleno 1987.

- [24] LAUDENSLAGER, M. J. a SIGMUND W. M. A continuous process to align electrospun nanofibers into parallel and crossed arrays. *Journal of Nanoparticle Research*. 2013, Volume 44, Issue 24. DOI: 10.1007/s11051-013-1487-7.
- [25] LI, D., WANG Y. a XIA Y. *Advanced Materials*. Electrospinning Nanofibers as Uniaxially Aligned Arrays and Layer-by-Layer Stacked Films. 2004, Volume 16, Issue 4, Pages 361–366. DOI: DOI: 10.1002/adma.200306226
- [26] Parazitologický ústav BC AV ČR: Elektronová mikroskopie pro biology. [online]. © 2010-2014 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.0.html>
- [27] FÍŘT, J. a Holota R. Digitalizace a zpracování obrazu. [online]. [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~holota5/publ/DigZprO.pdf>
- [28] MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. V Liberci: Technická univerzita, 2012, 374 s. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [29] KOŠKOVÁ, Bohumila. *Struktura a vlastnosti vláken*. 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1989, 316 s. ISBN 80-708-3018-2.
- [30] Soil mechanics. [online]. [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/basic/stiffness.htm>
- [31] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-708-0617-6.
- [32] CHANDRA, R. a RUSTGI R. Biodegradable polymers. *Progress in Polymer Science*. 1998, Volume 23, Issue 7, 1273–1335. DOI: 10.1016/S0079-6700(97)00039-7.
- [33] ChemPoint: Polykaprolakton-biodegradabilní polyester. [online]. 2012 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/polykaprolakton-biodegradabilni-polyester>
- [34] Polycaprolactone. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polycaprolactone>

PŘÍLOHY

OBSAH

Příloha č. I: Naměřené hodnoty otáček	79
Příloha č. II: Polární diagramy nanovláknenných vrstev	81
Příloha č. III: SEM snímky nanovláknenných vrstev	102
Příloha č. IV: Tahové křivky zkoušených vzorků	113
Příloha č. V: Naměřené hodnoty tahových zkoušek	119

Nastavené otáčky	Průměr naměřených otáček	Směrodatná odchylka	Dolní mez intervalu spolehlivosti	Horní mez intervalu spolehlivosti
5000	5216,8	50,6	5172,4	5261,2
10000	6034,8	46	5994,5	6075,1
15000	10669,4	73,4	10605	10733,8
20000	20950,4	98,1	20864,4	21036,4
25000	24032	114,4	23931,7	24132,3
30000	30169	364	29850	30488
31000	31617,4	41,8	31580,8	31654
32000	32830,6	57	32780,6	32880,6
33000	34558,8	33,4	34529,5	34588,1
34000	35514	40,4	35478,6	35549,4
35000	36547,2	140,2	36424,3	36670,1

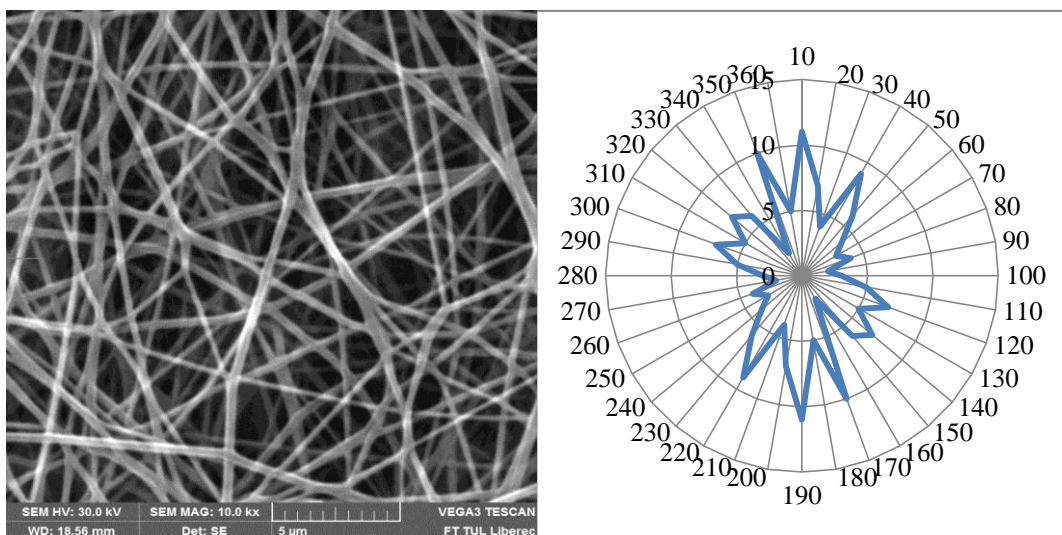
Tab. I.1 Naměřené hodnoty otáček bez kolektoru

Nastavené otáčky	Průměr naměřených otáček	Směrodatná odchylka	Dolní mez intervalu spolehlivosti	Horní mez intervalu spolehlivosti
5000	3068,6	60,3	3015,7	3121,5
10000	4401	52,4	4355	4447
15000	8706,8	73,7	8642,2	8771,4
20000	20255	146,3	20126,8	20383,2
25000	23566,8	27,5	23542,7	23590,9
30000	29231	68,2	29171,2	29290,8
31000	30098,6	12,6	30087,6	30109,6
32000	31323,6	13	31312,2	31335
33000	33267,4	27,8	33243	33291,8
34000	33510,4	58,5	33459,1	33561,7
35000	34132,6	57,8	34081,9	34183,3

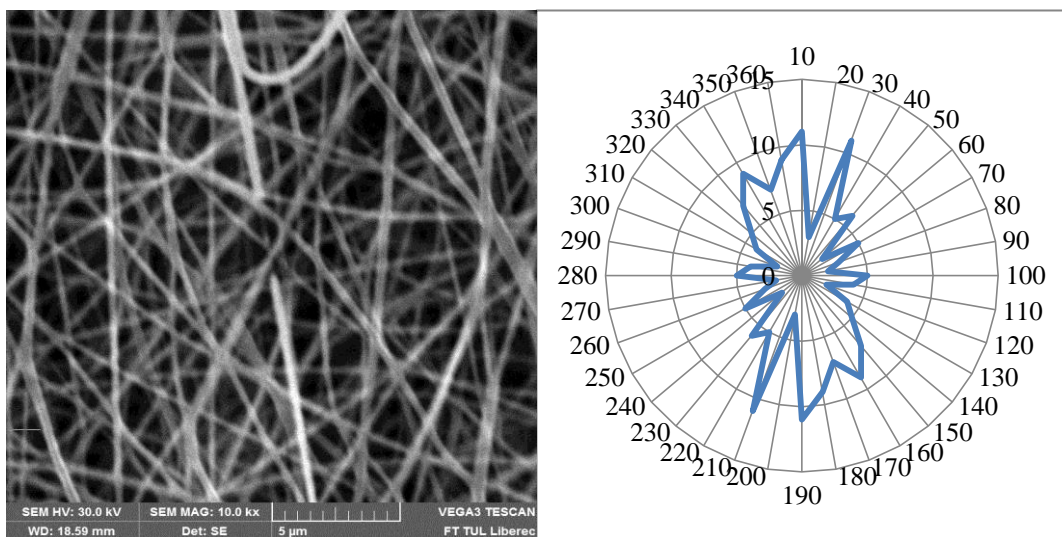
Tab. I. 2 Naměřené hodnoty otáček s kolektorem (stupnice vzestupně)

Nastavené otáčky	Průměr naměřených otáček	Směrodatná odchylka	Dolní mez intervalu spolehlivosti	Horní mez intervalu spolehlivosti
5000	3348,2	175,4	3194,5	3501,9
10000	5095,8	81,0	5024,8	5166,8
15000	11847,6	52,2	11801,8	11893,4
20000	19835,8	59,0	19784,1	19887,5
25000	24053,2	43,9	24014,8	24091,6
30000	29341,6	31,5	29314,0	29369,2
31000	30492,8	76,7	30425,5	30560,1
32000	31918,4	55,6	31869,7	31967,1
33000	32354,4	23,9	32333,4	32375,4
34000	32527,8	131,0	32413,0	32642,6
35000	34153,8	122,1	34046,7	34260,9

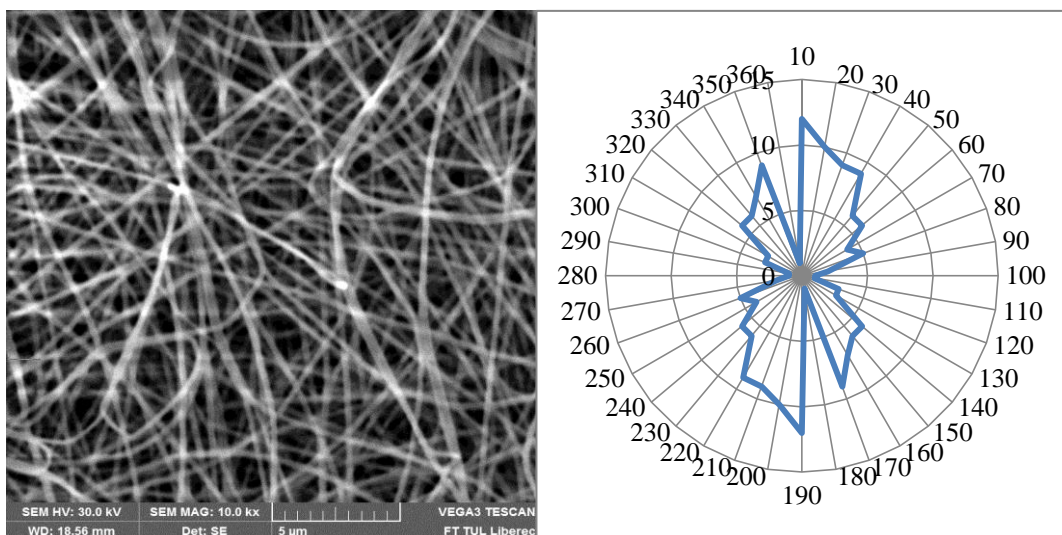
Tab. I. 3 Naměřené hodnoty otáček s kolektorem (stupnice sestupně)



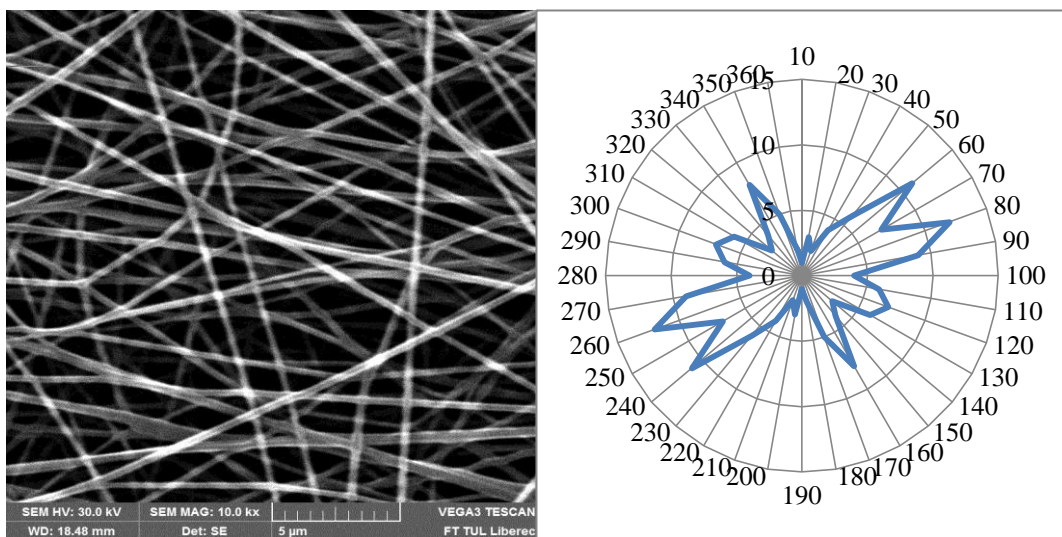
Vlevo obr. II.1 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.1 ukazující orientaci vláken



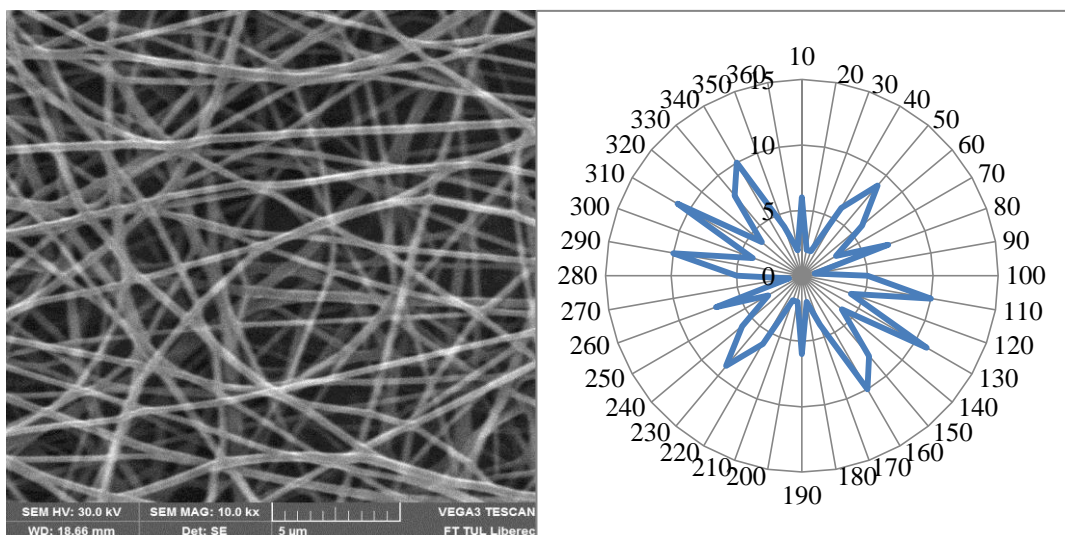
Vlevo obr. II.2 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.2 ukazující orientaci vláken



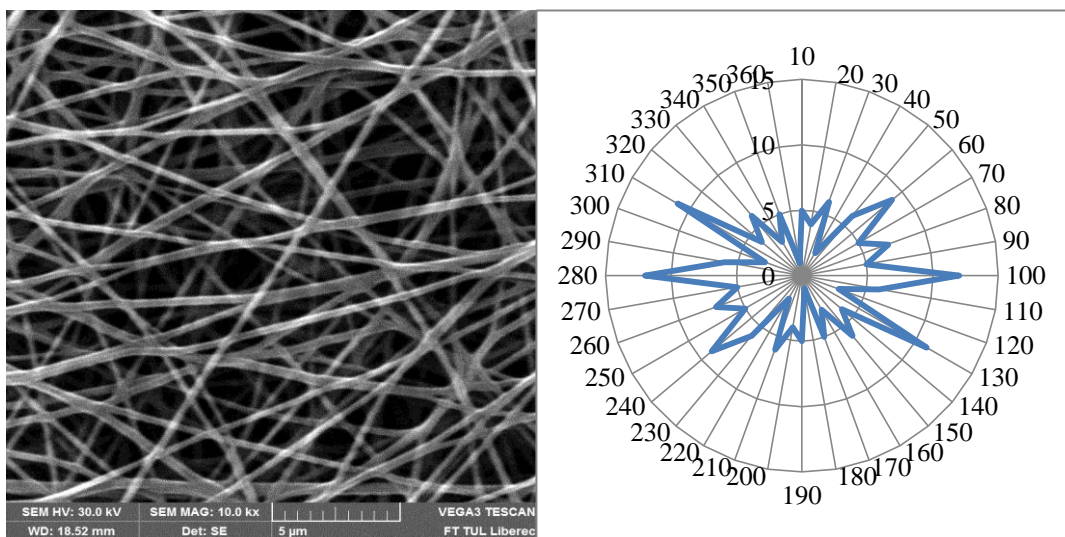
Vlevo obr. II.3 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.3 ukazující orientaci vláken



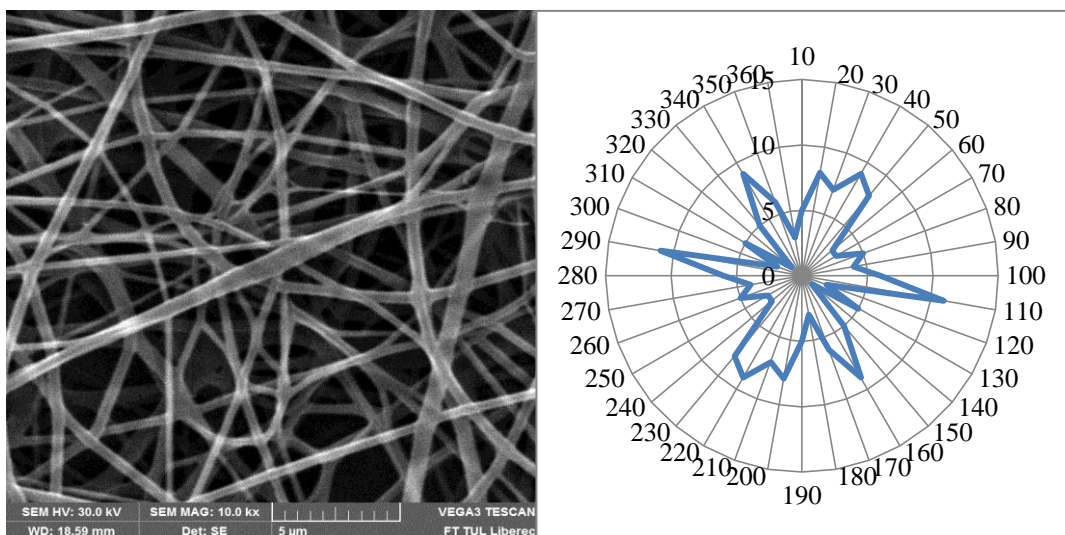
Vlevo obr. II.4 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.4 ukazující orientaci vláken



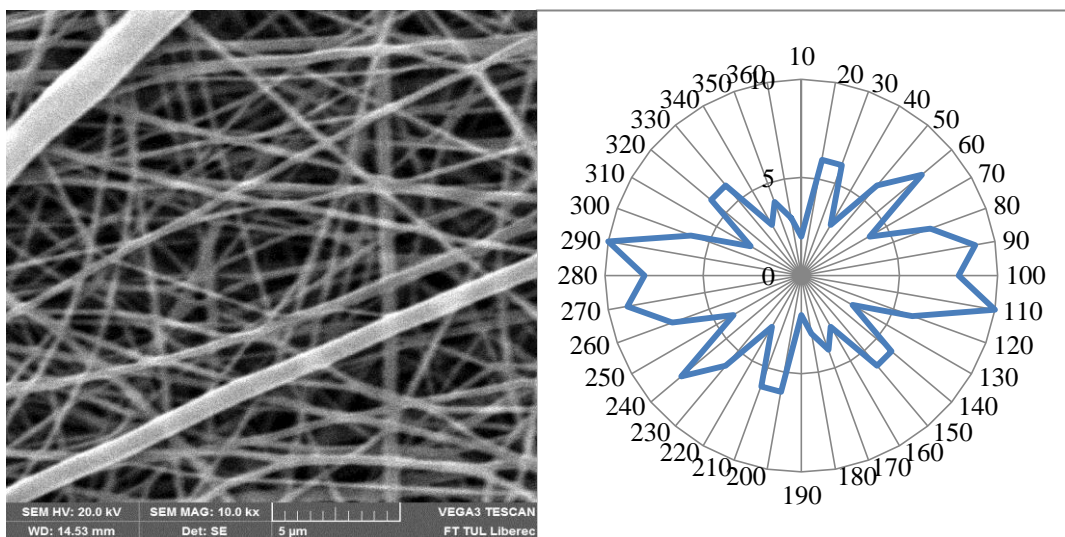
Vlevo obr. II.5 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.5 ukazující orientaci vláken



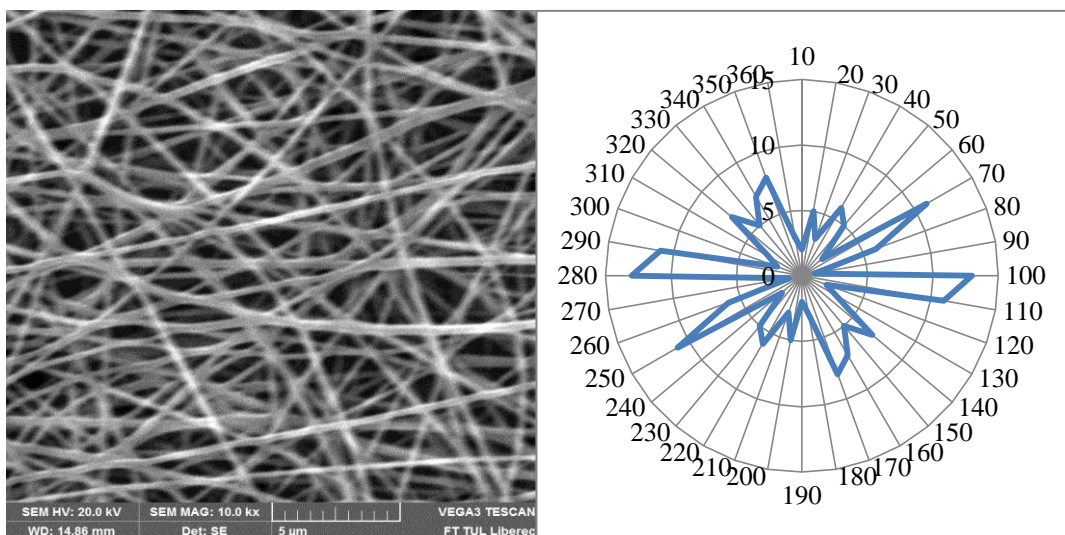
Vlevo obr. II.6 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.6 ukazující orientaci vláken



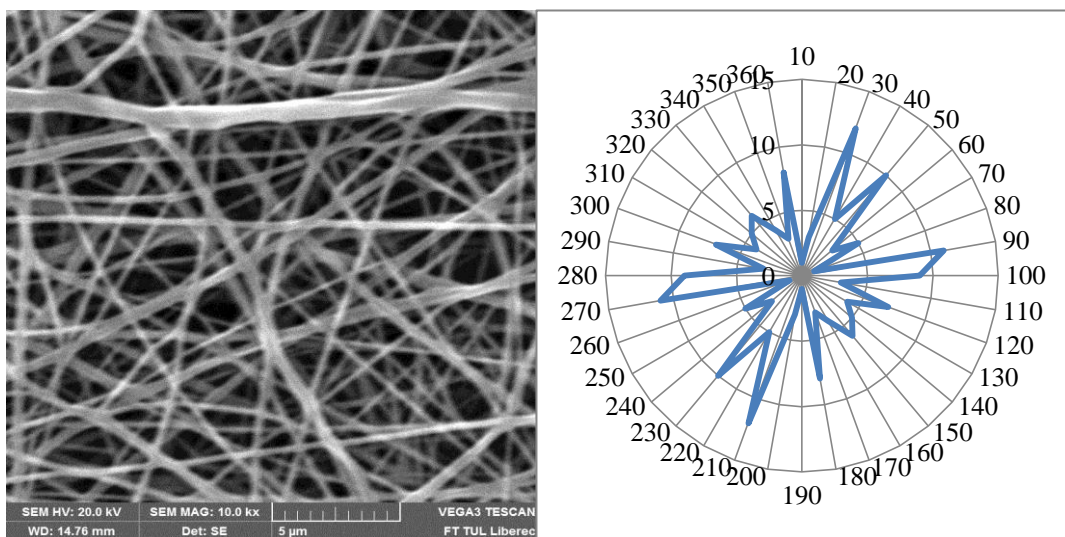
Vlevo obr. II.7 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.7 ukazující orientaci vláken



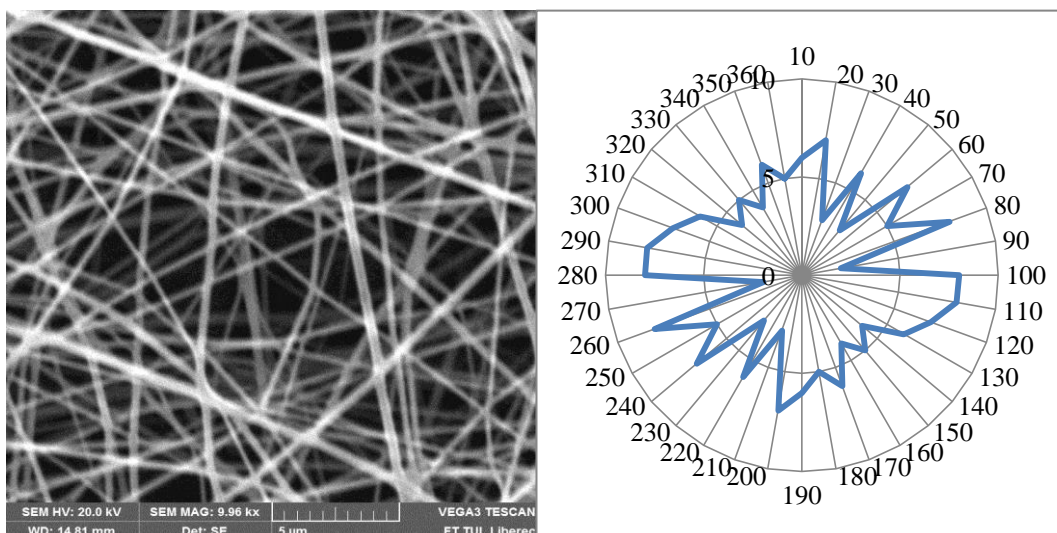
Vlevo obr. II.8 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.8 ukazující orientaci vláken



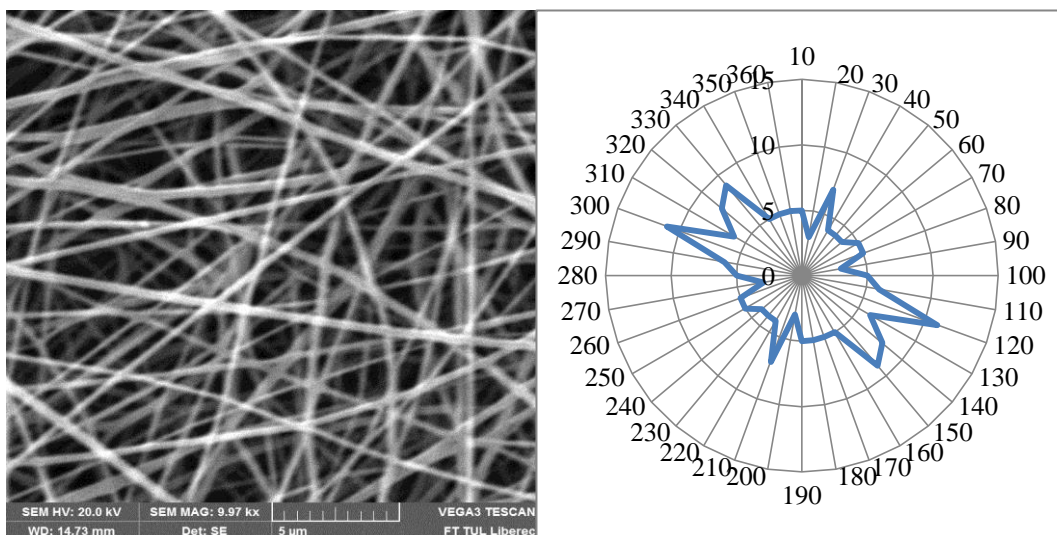
Vlevo obr. II.9 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.9 ukazující orientaci vláken



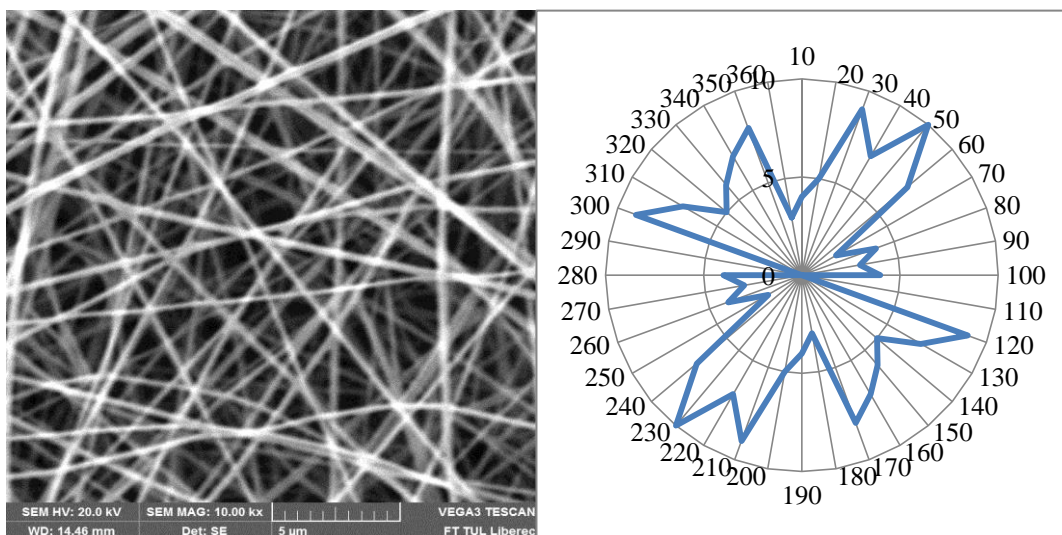
Vlevo obr. II.10 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.10 ukazující orientaci vláken



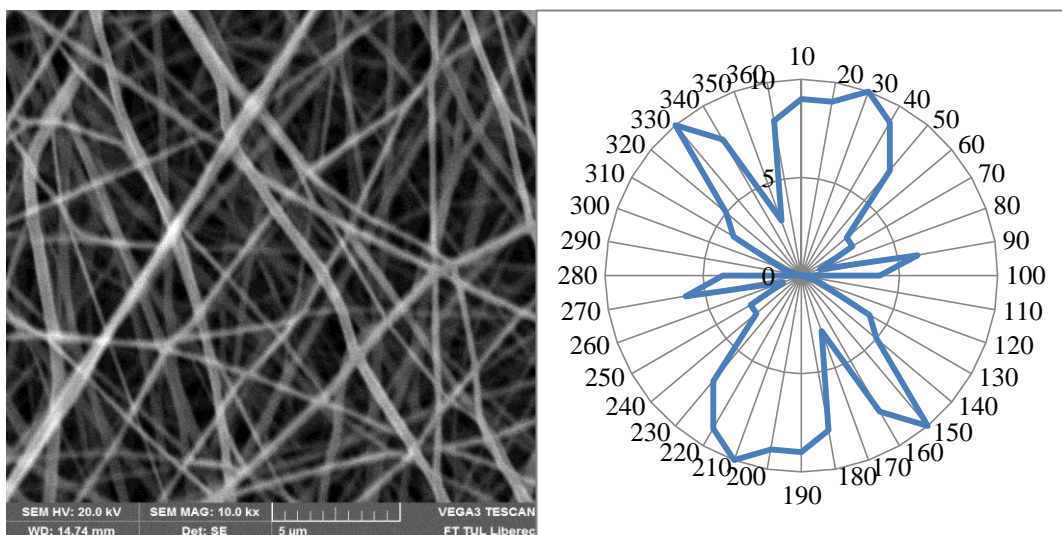
Vlevo obr. II.11 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.11 ukazující orientaci vláken



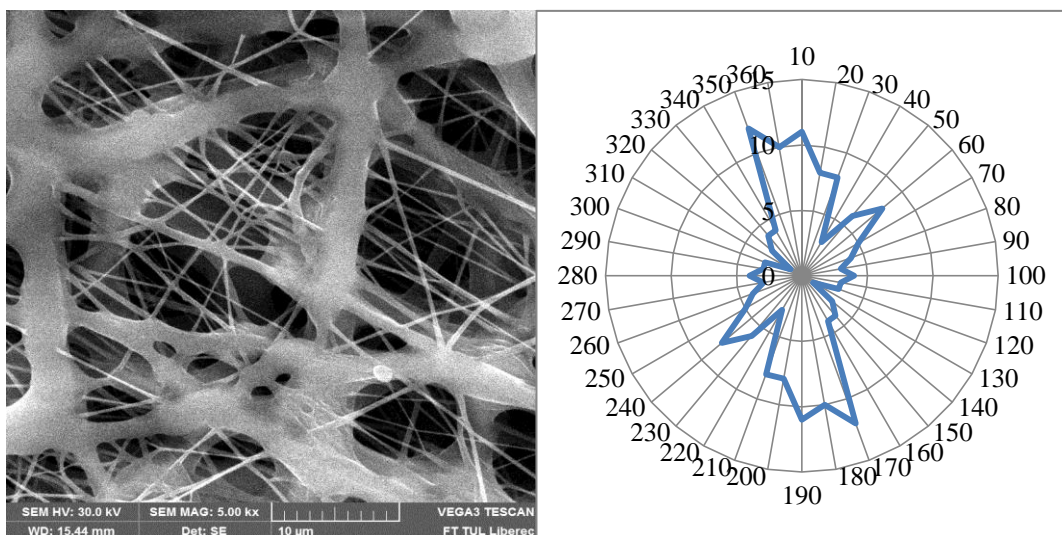
Vlevo obr. II.12 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.12 ukazující orientaci vláken



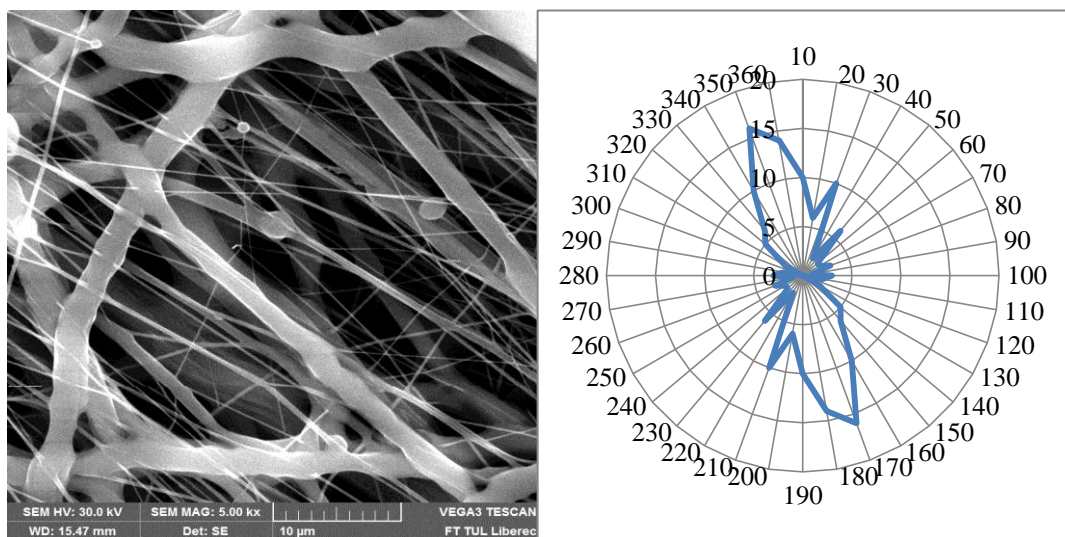
Vlevo obr. II.13 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.13 ukazující orientaci vláken



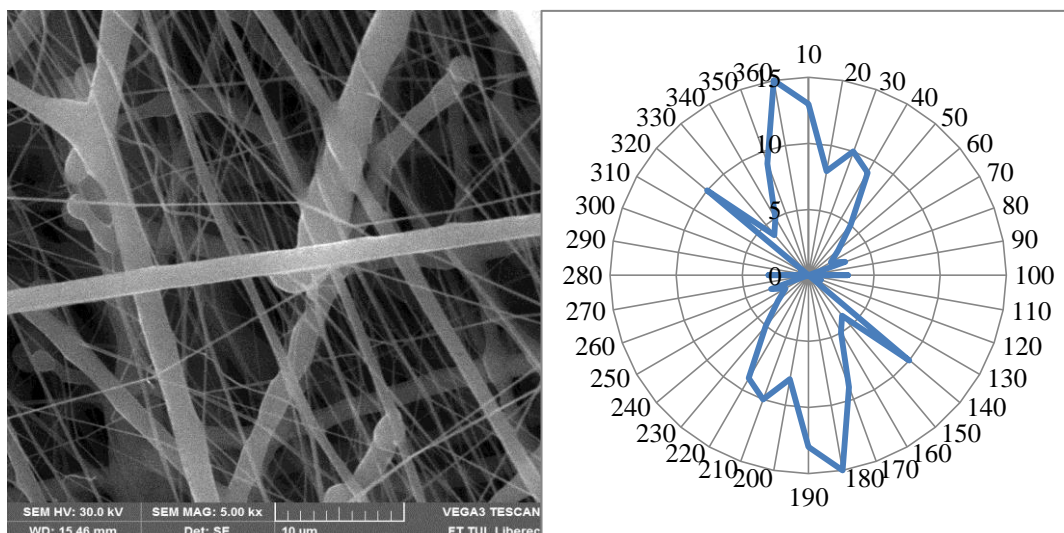
Vlevo obr. II.14 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.14 ukazující orientaci vláken



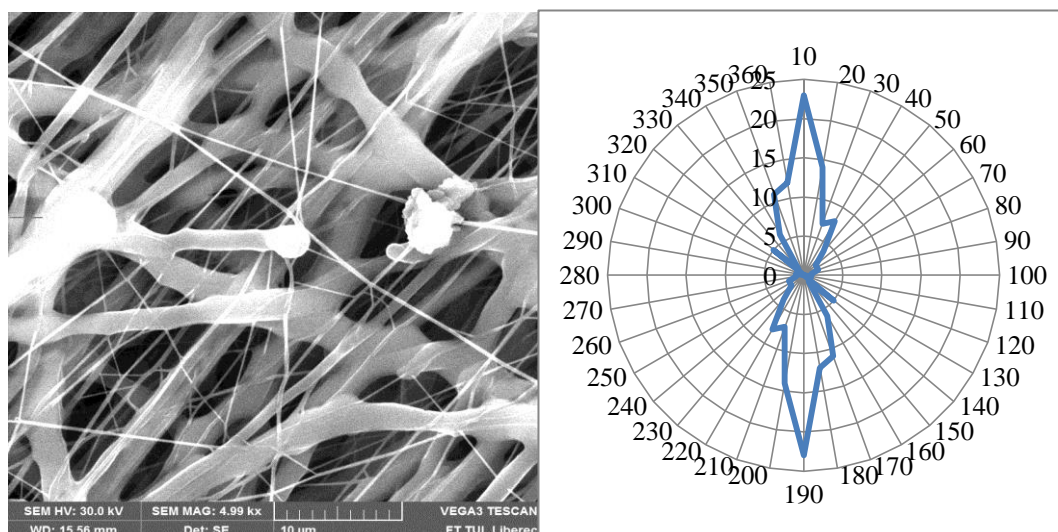
Vlevo obr. II.15 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.15 ukazující orientaci vláken



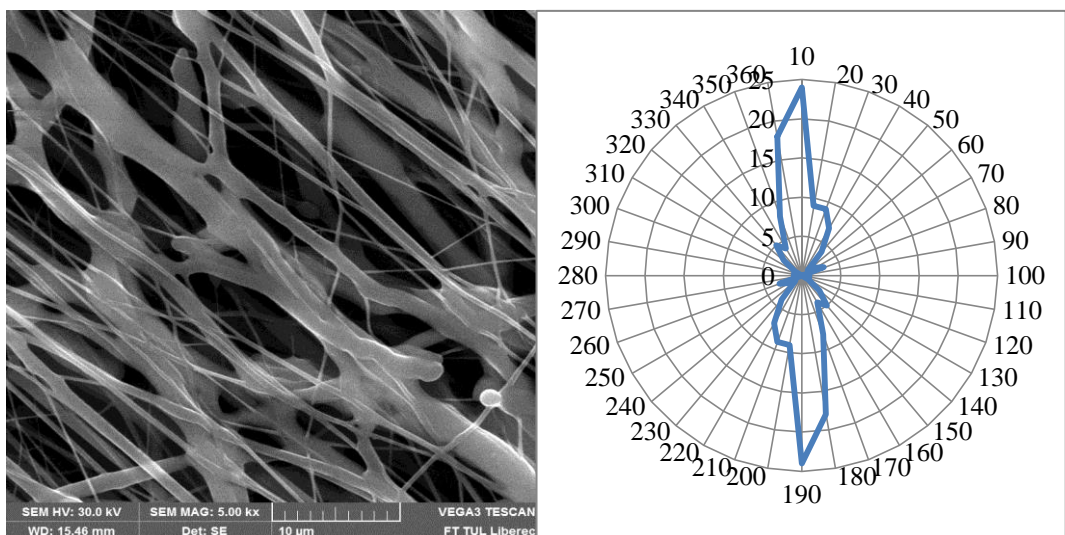
Vlevo obr. II.16 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.16 ukazující orientaci vláken



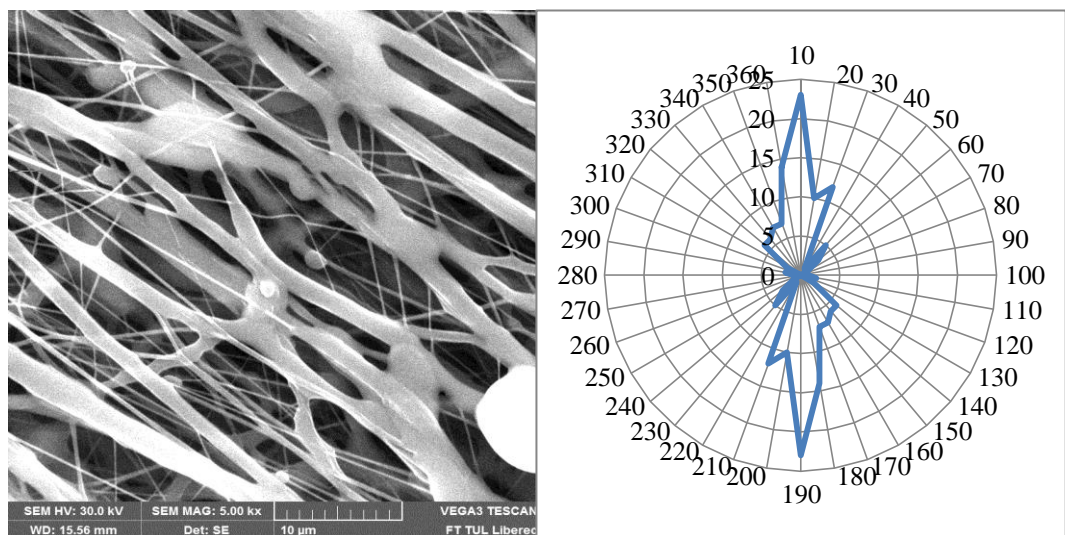
Vlevo obr. II.17 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.17 ukazující orientaci vláken



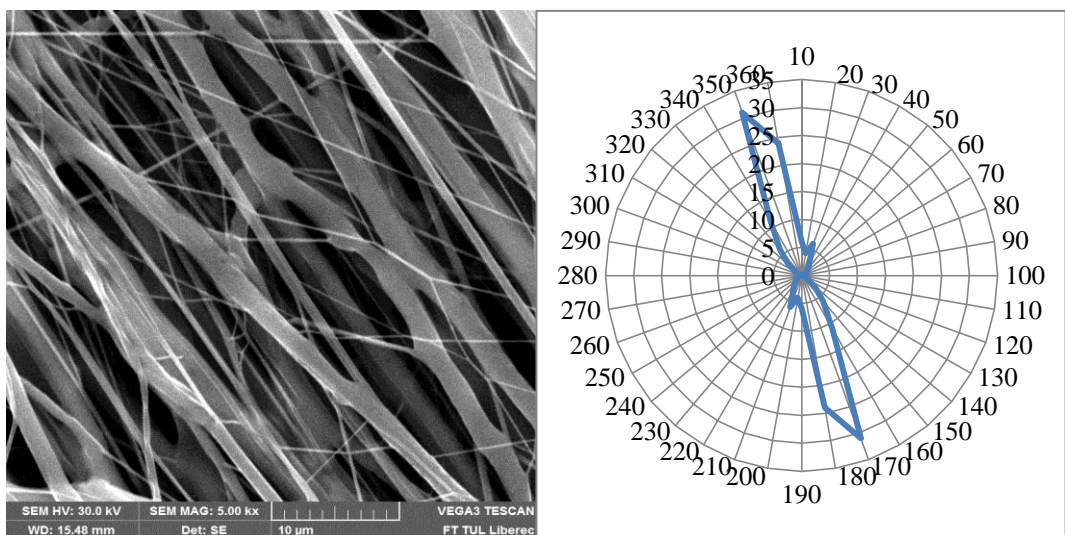
Vlevo obr. II.18 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.18 ukazující orientaci vláken



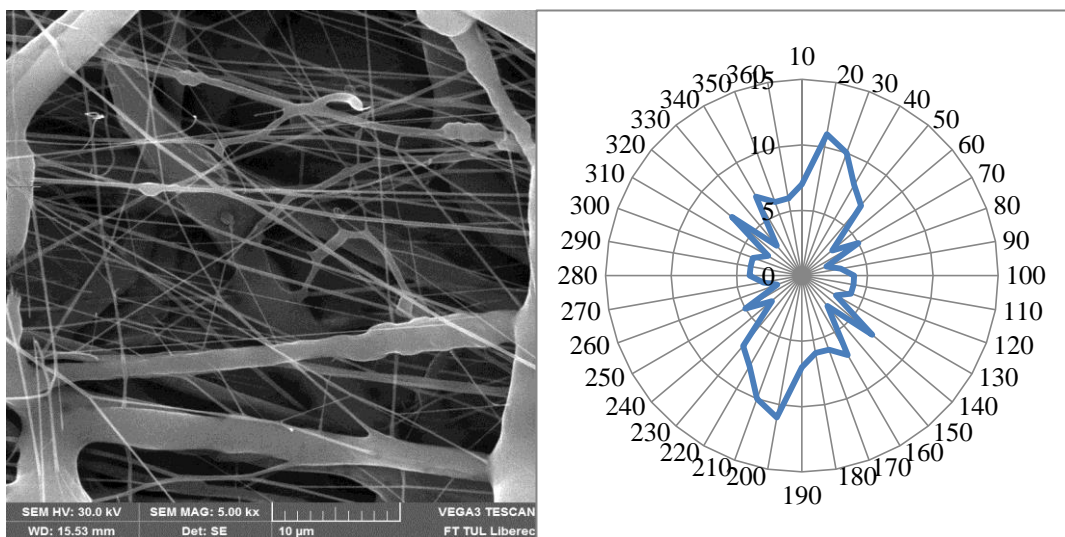
Vlevo obr. II.19 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.19 ukazující orientaci vláken



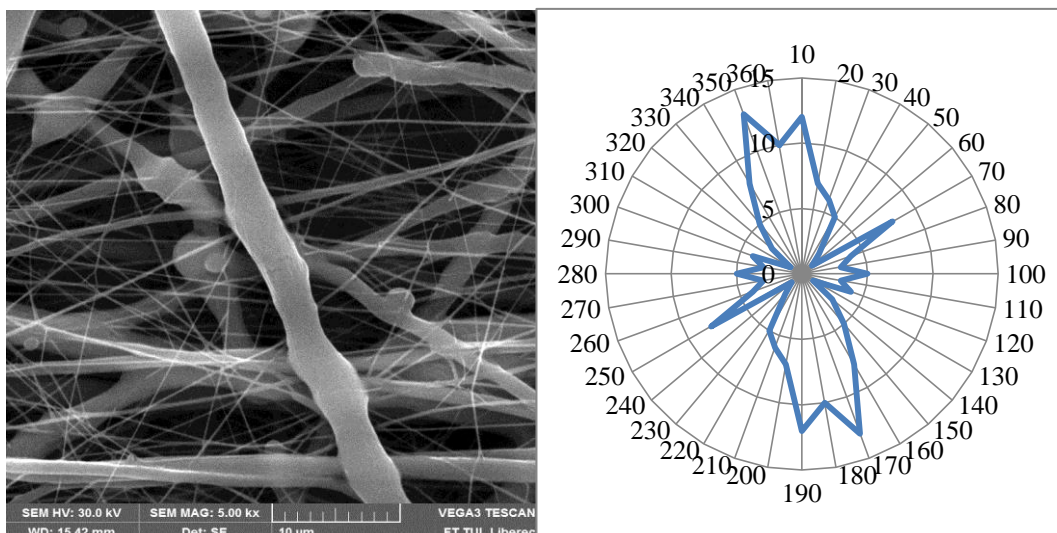
Vlevo obr. II.20 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.20 ukazující orientaci vláken



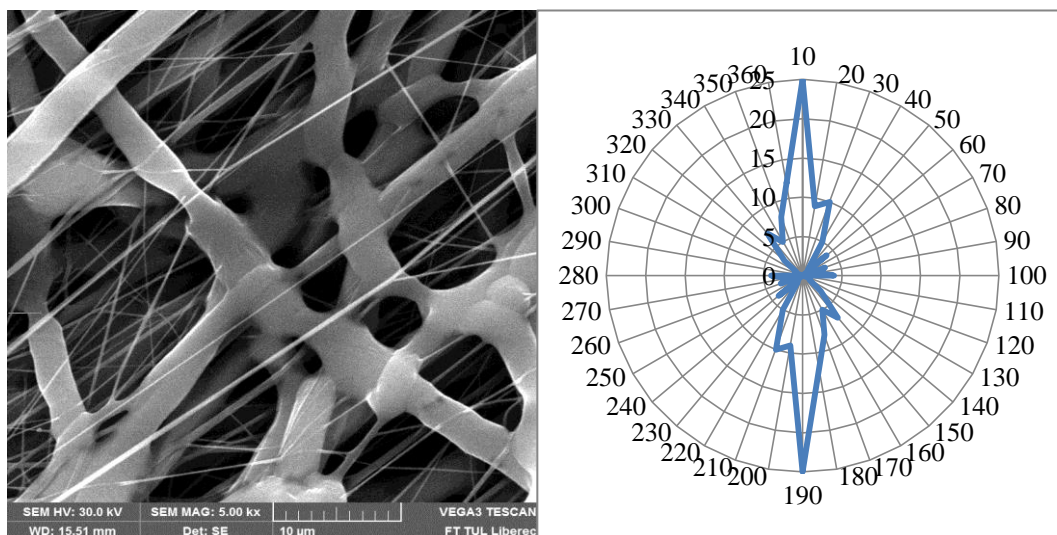
Vlevo obr. II.21 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.21 ukazující orientaci vláken



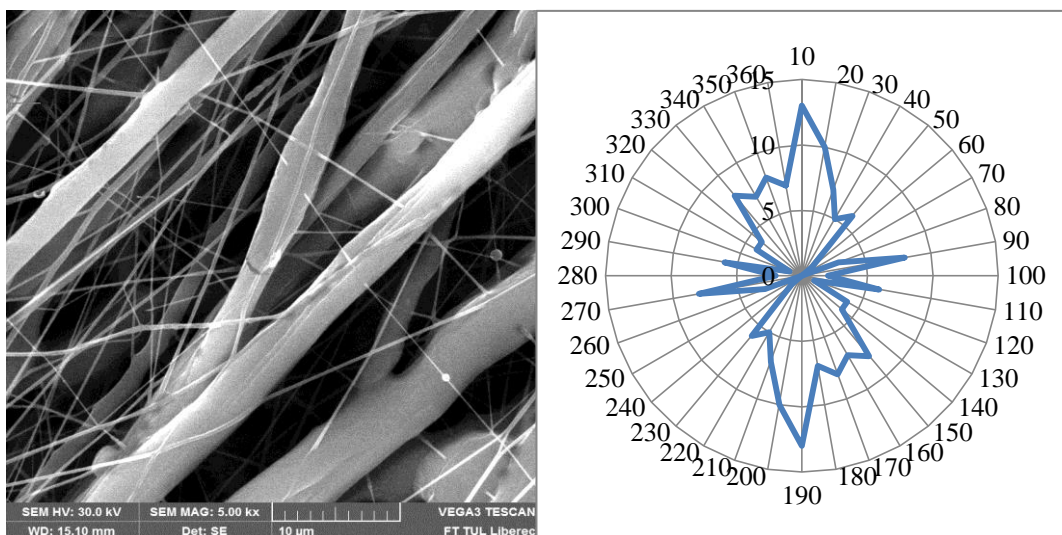
Vlevo obr. II.22 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.22 ukazující orientaci vláken



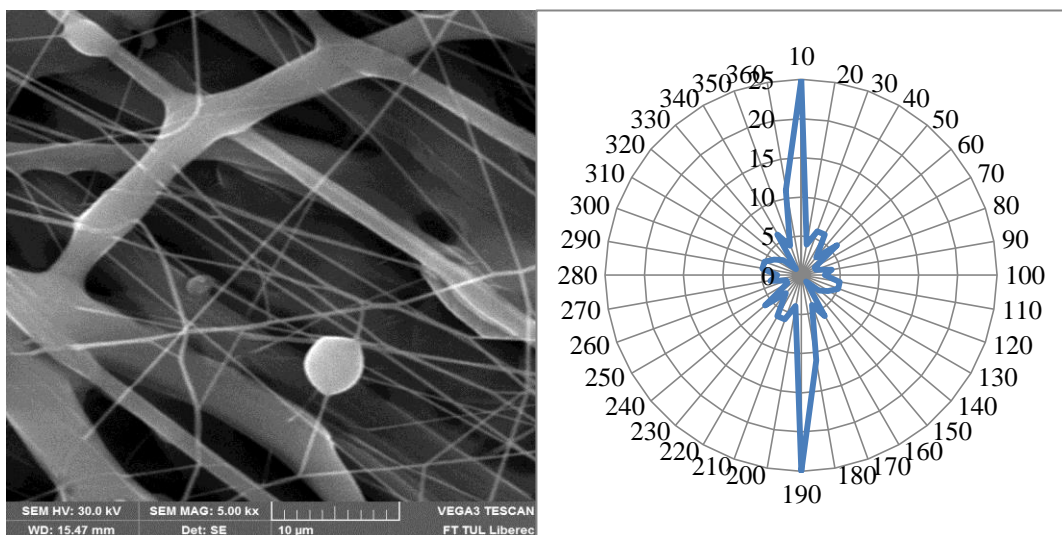
Vlevo obr. II.23 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.23 ukazující orientaci vláken



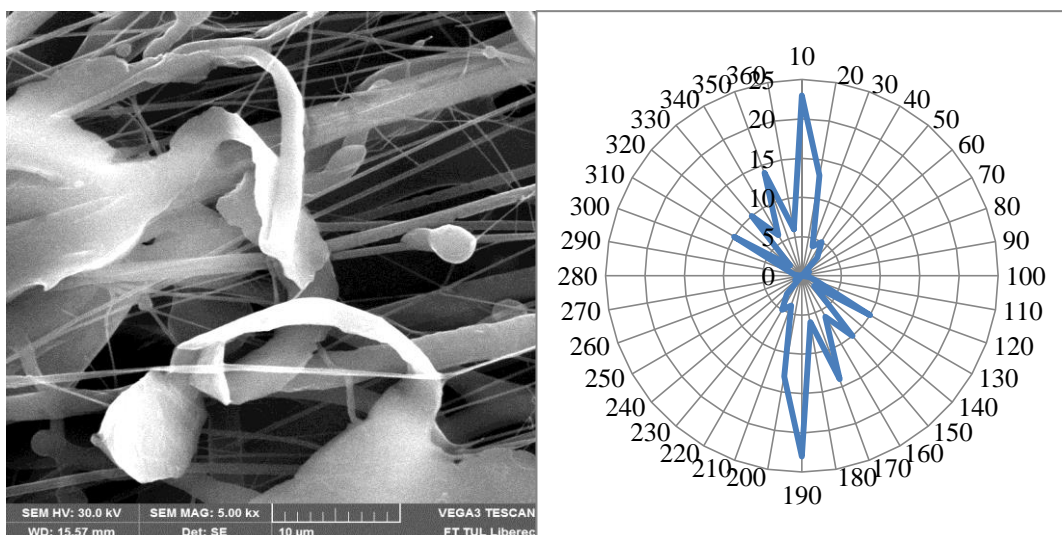
Vlevo obr. II.24 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.24 ukazující orientaci vláken



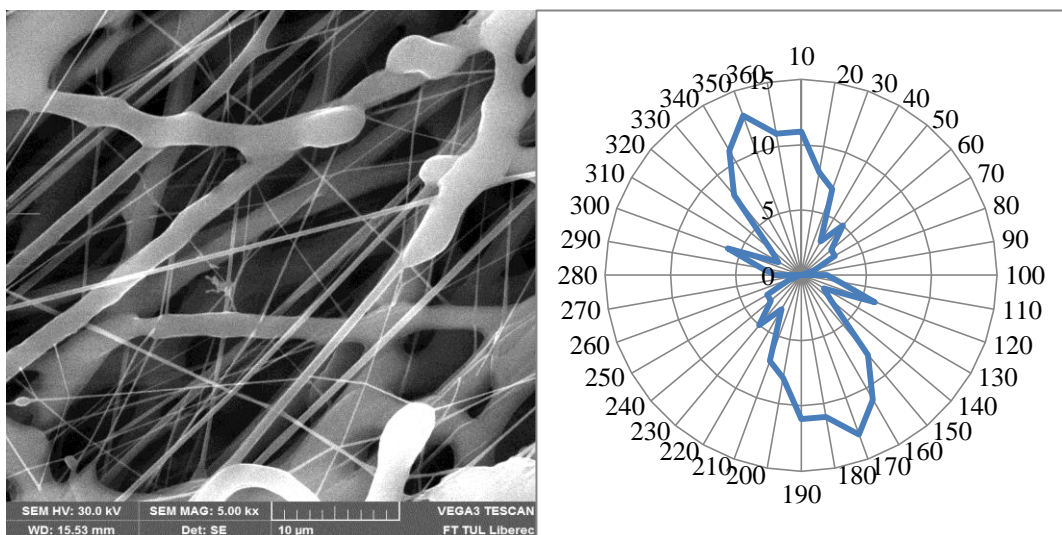
Vlevo obr. II.25 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.25 ukazující orientaci vláken



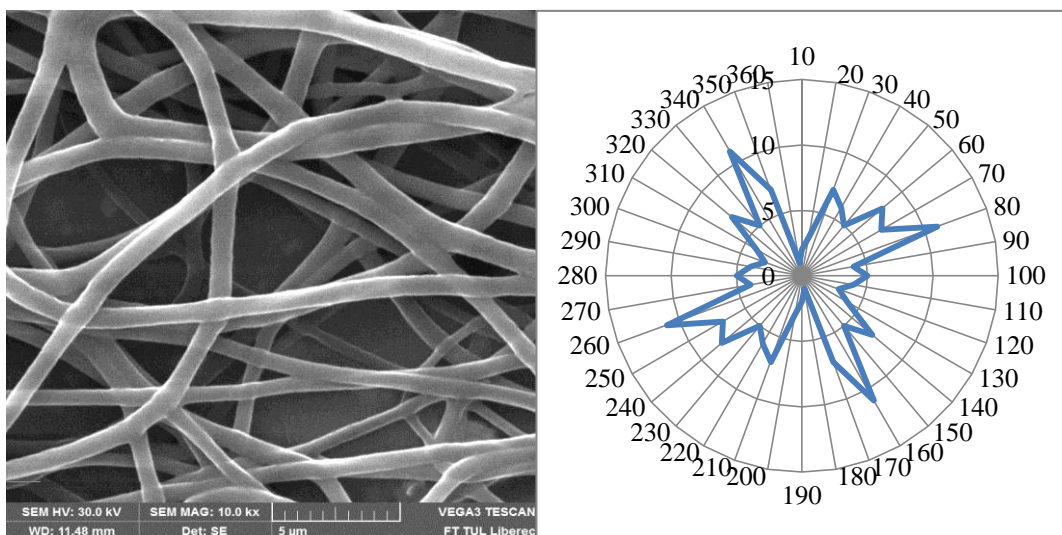
Vlevo obr. II.26 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.26 ukazující orientaci vláken



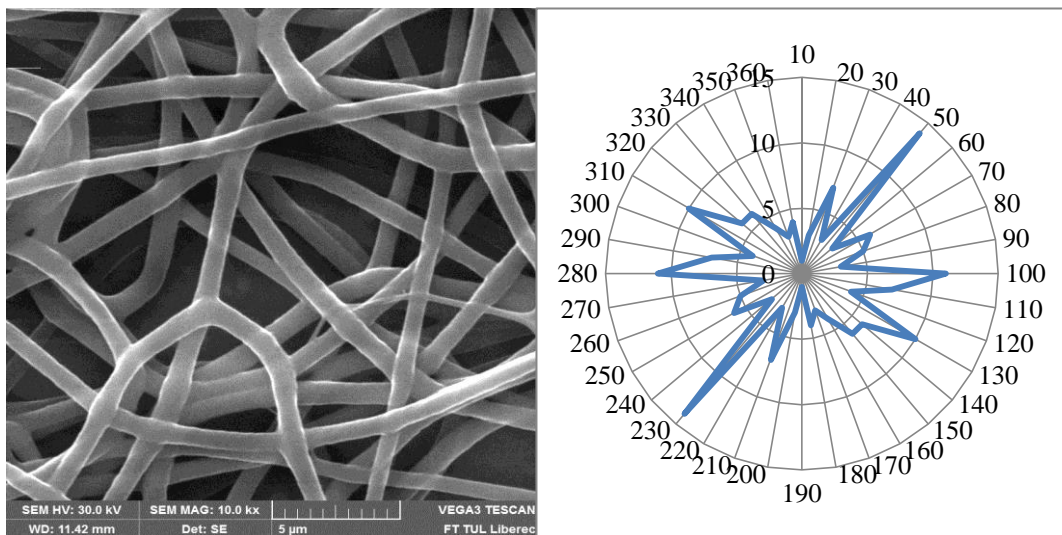
Vlevo obr. II.27 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.27 ukazující orientaci vláken



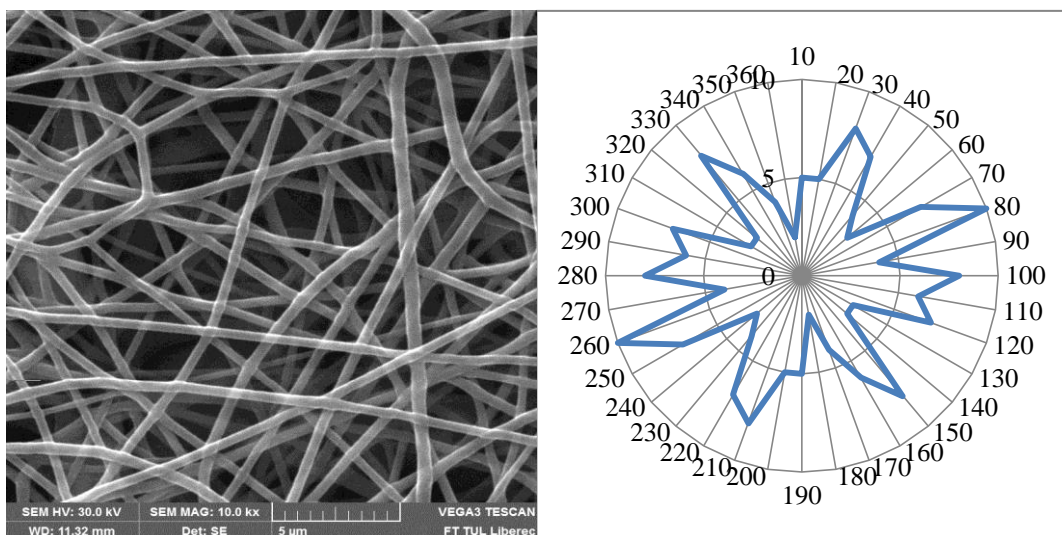
Vlevo obr. II.28 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.28 ukazující orientaci vláken



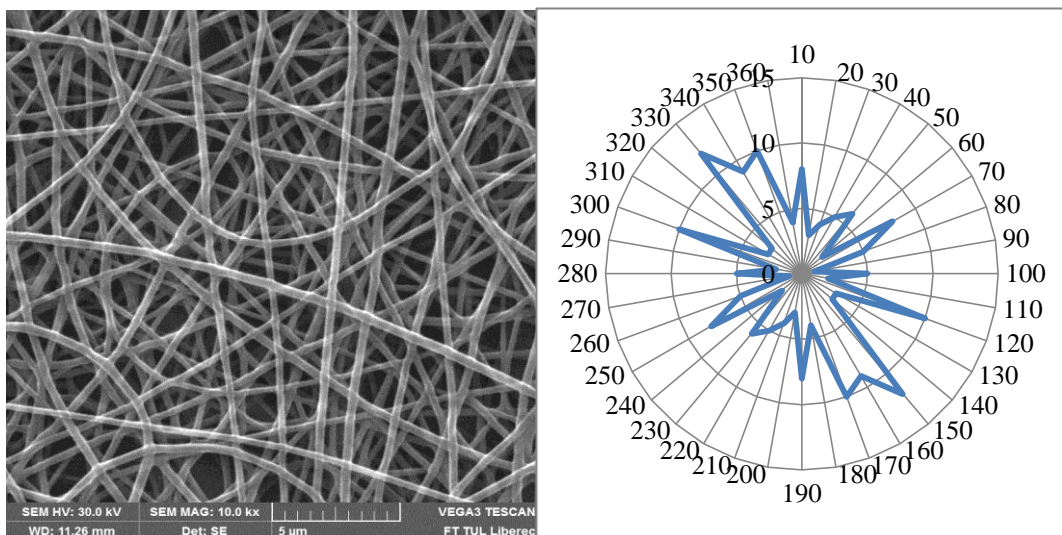
Vlevo obr. II.29 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.29 ukazující orientaci vláken



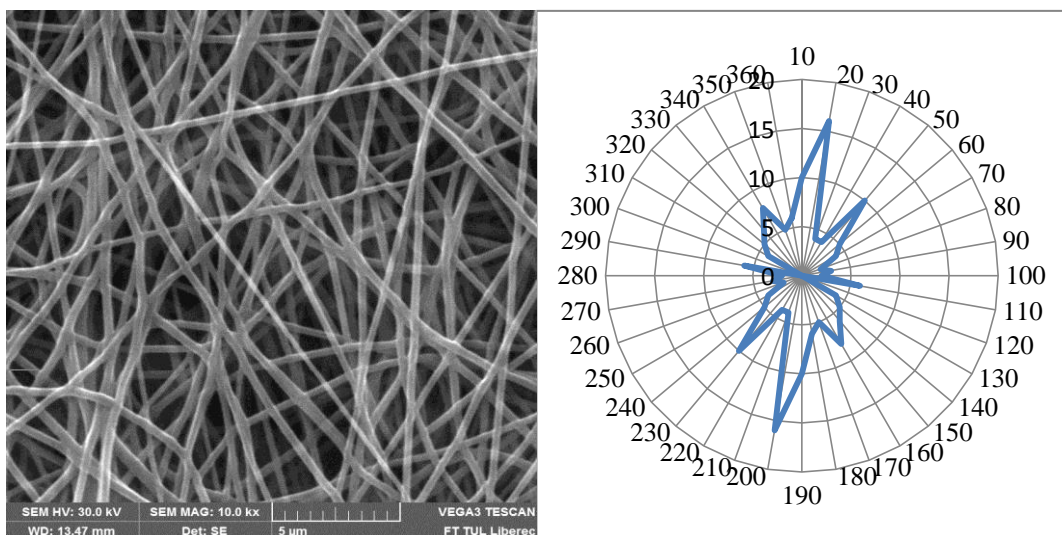
Vlevo obr. II.30 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 5000x; vpravo graf II.30 ukazující orientaci vláken



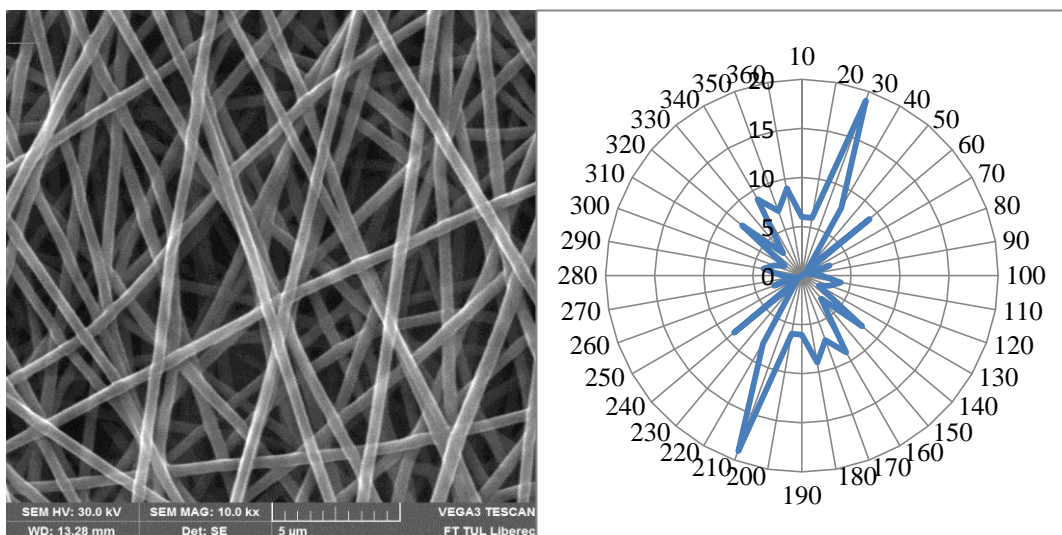
Vlevo obr. II.31 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.31 ukazující orientaci vláken



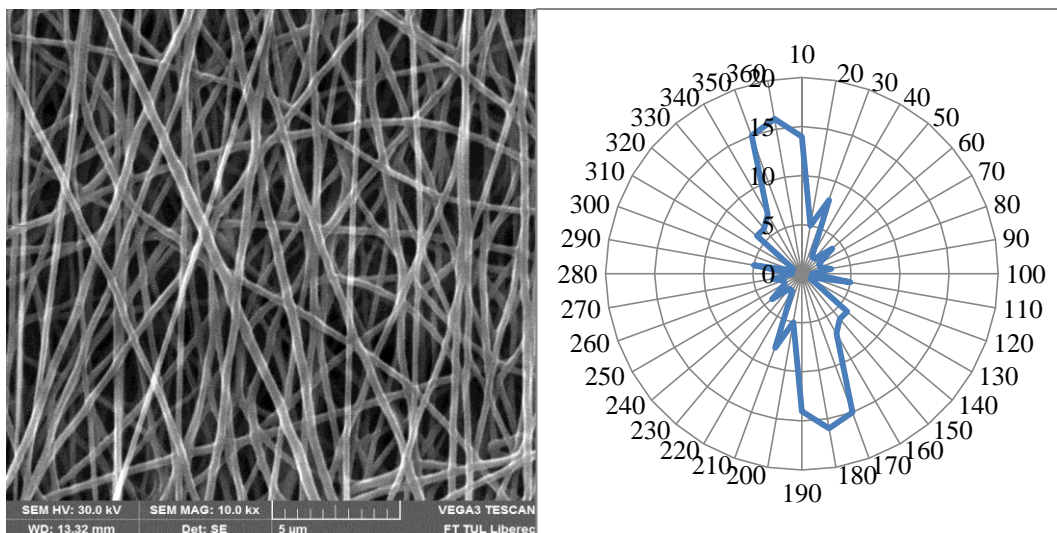
Vlevo obr. II.32 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.32 ukazující orientaci vláken



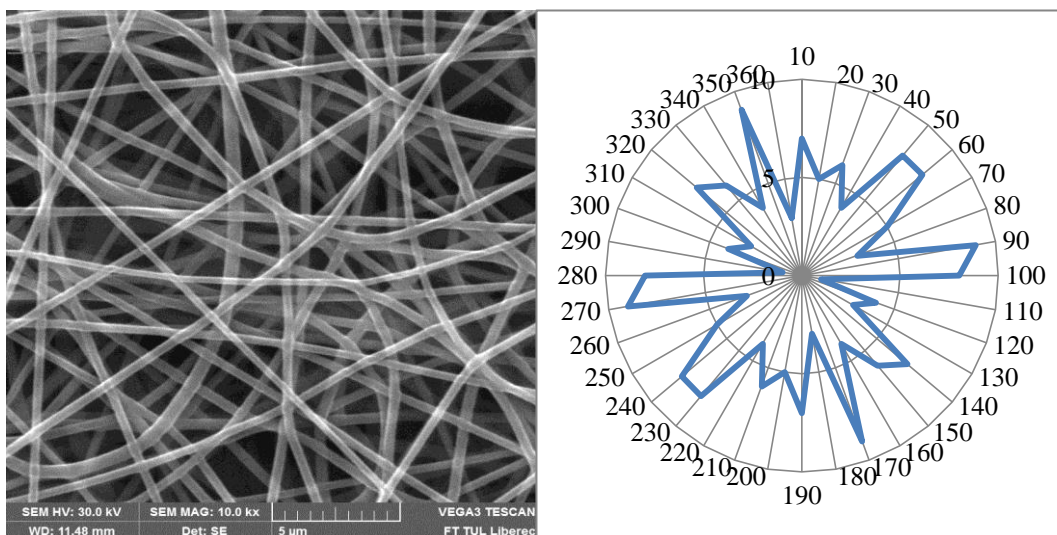
Vlevo obr. II.33 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.33 ukazující orientaci vláken



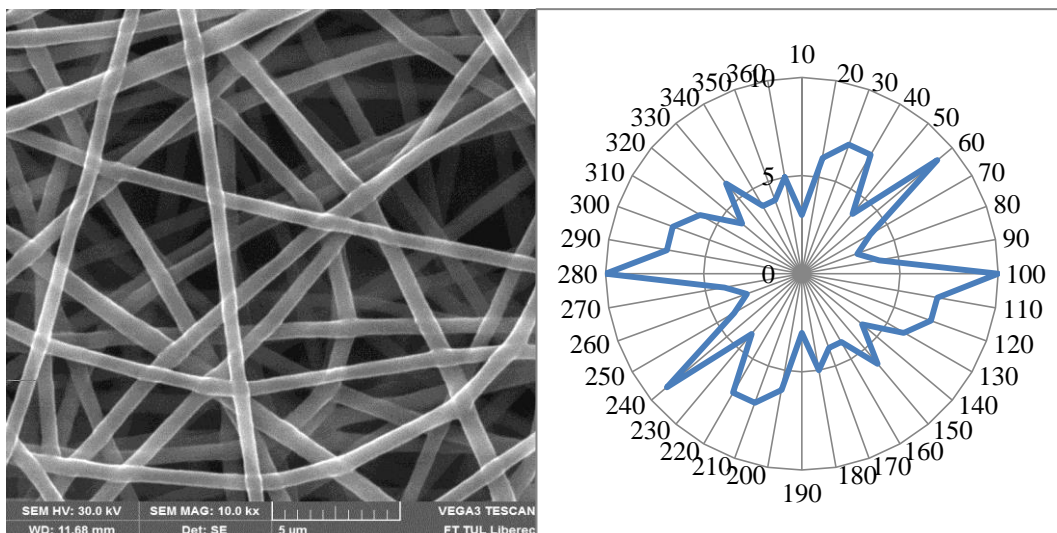
Vlevo obr. II.34 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.34 ukazující orientaci vláken



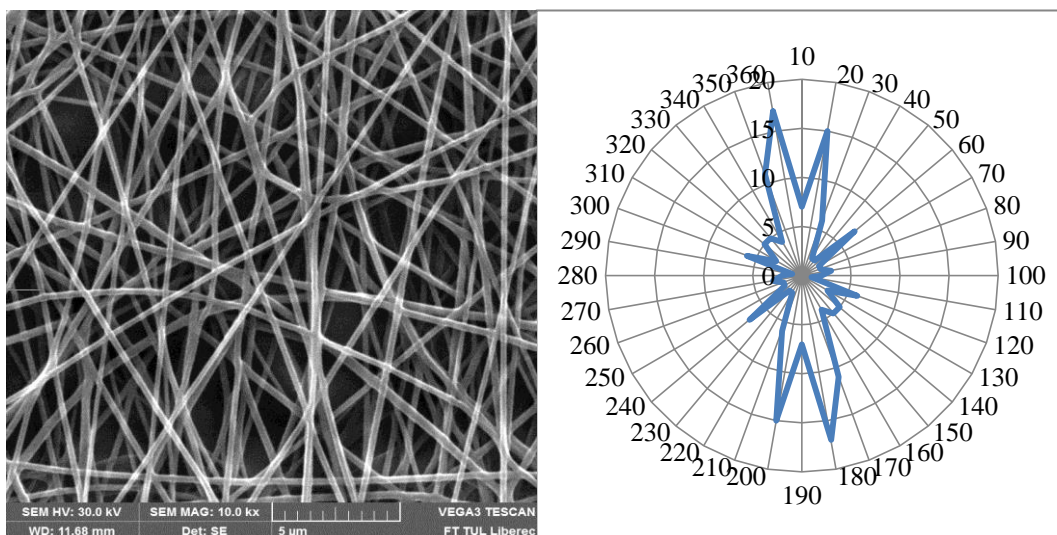
Vlevo obr. II.35 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.35 ukazující orientaci vláken



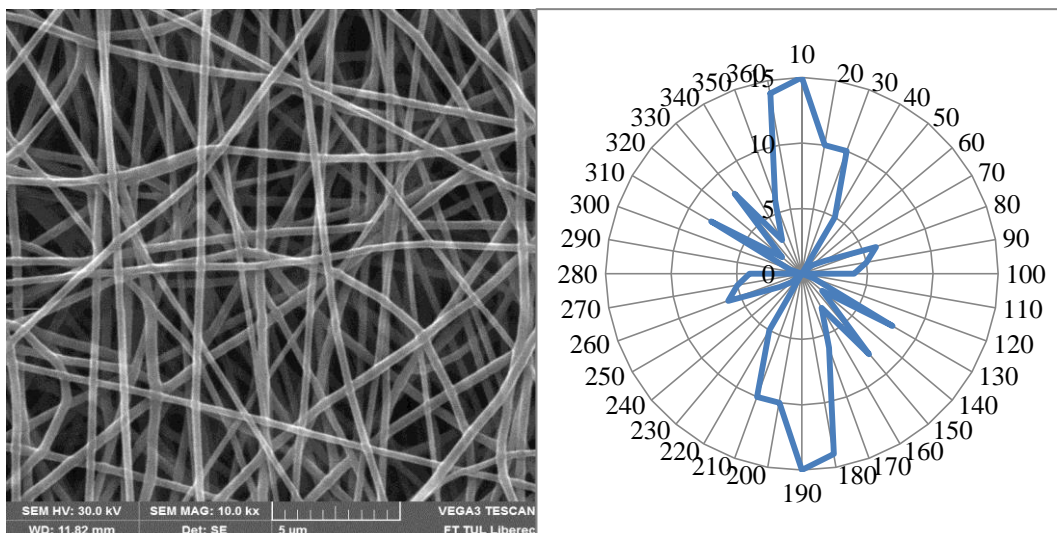
Vlevo obr. II.36 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.36 ukazující orientaci vláken



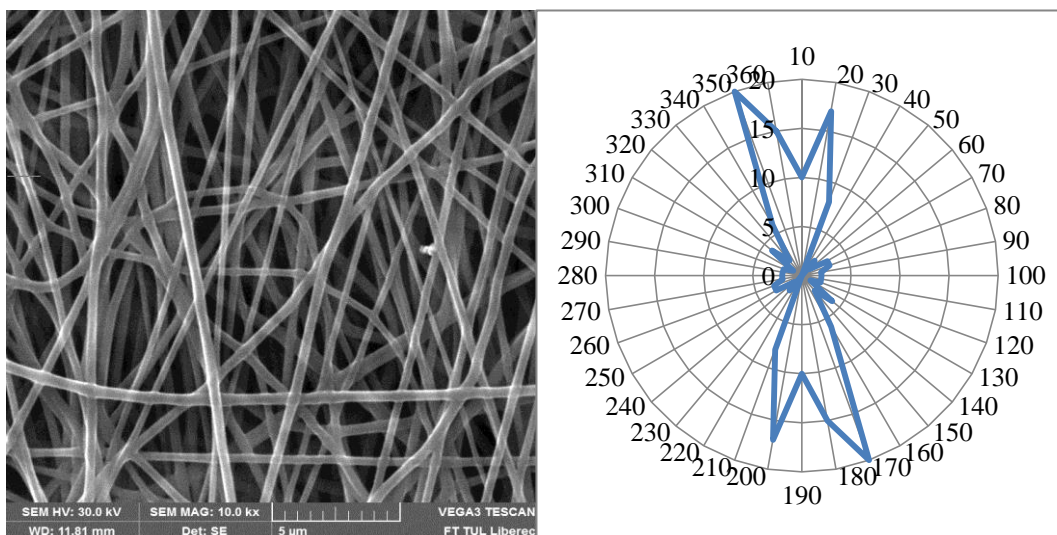
Vlevo obr. II.37 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.37 ukazující orientaci vláken



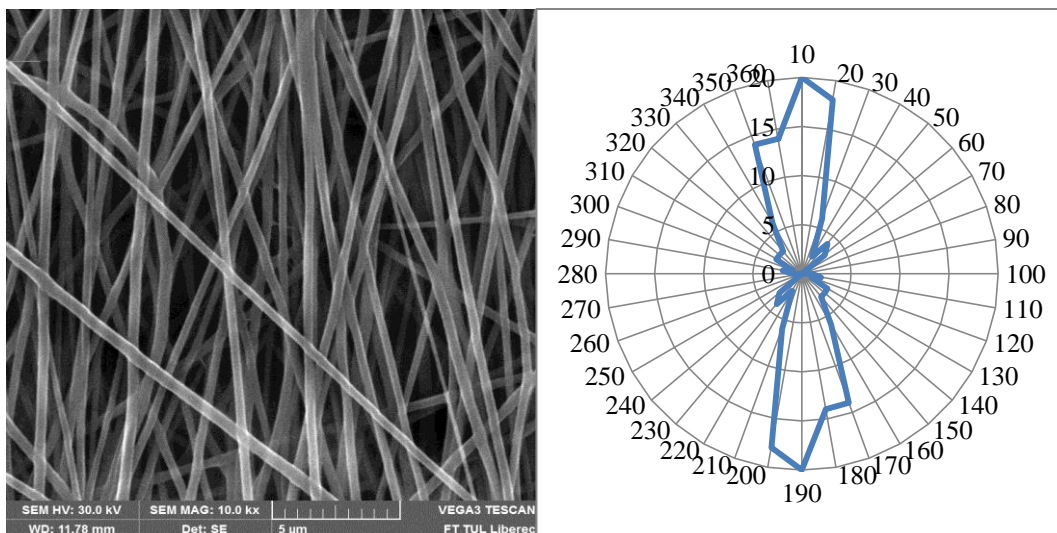
Vlevo obr. II.38 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.38 ukazující orientaci vláken



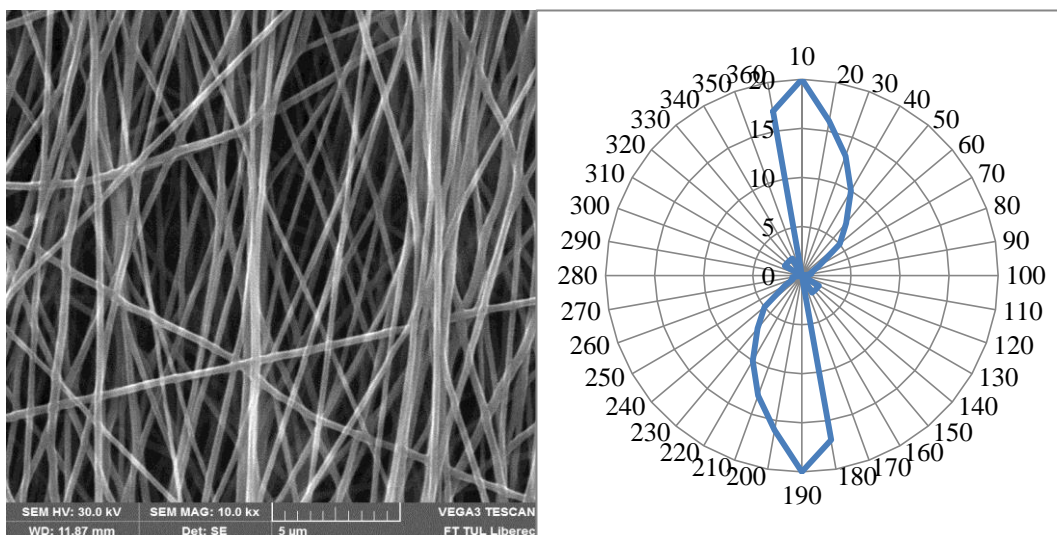
Vlevo obr. II.39 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.39 ukazující orientaci vláken



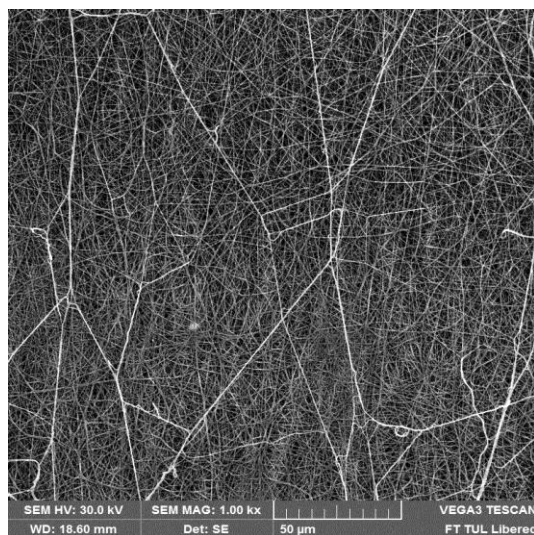
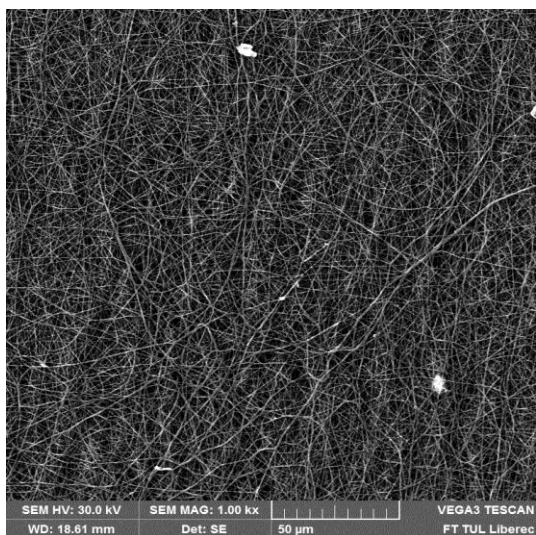
Vlevo obr. II.40 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.40 ukazující orientaci vláken



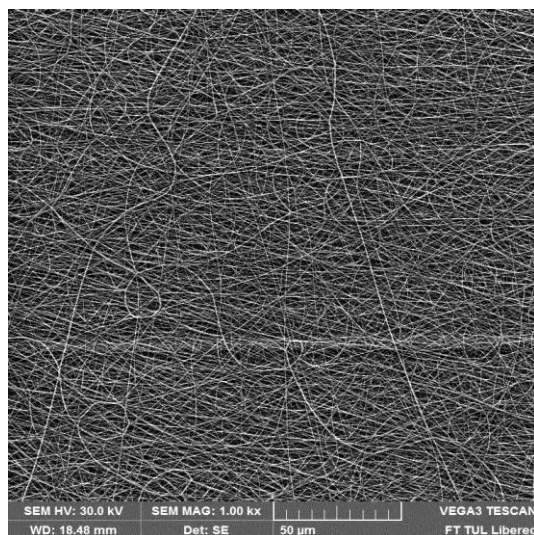
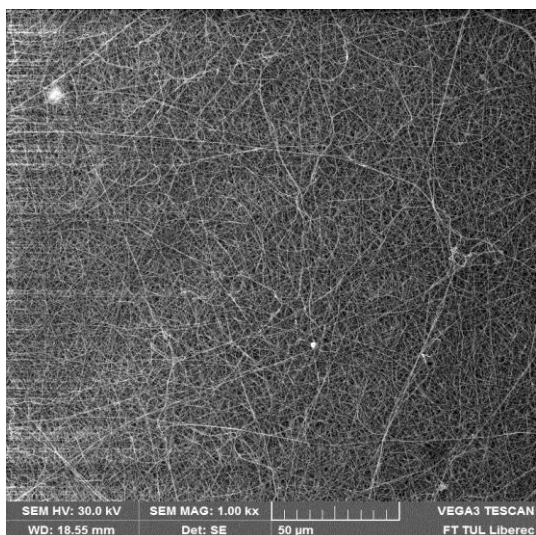
Vlevo obr. II.41 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.41 ukazující orientaci vláken



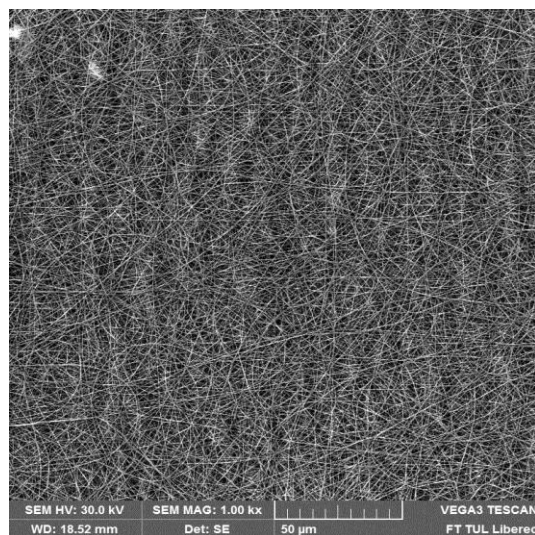
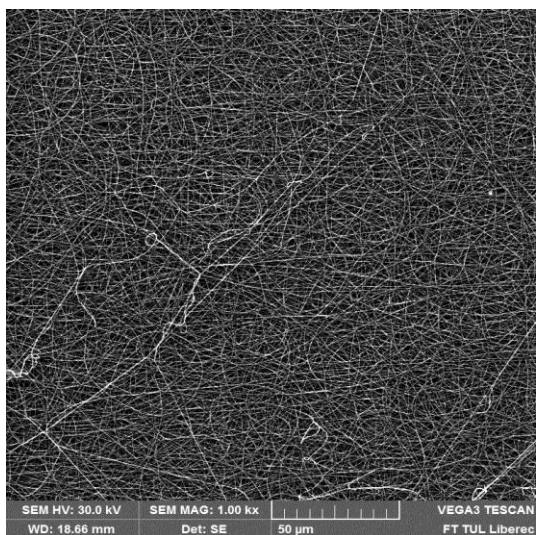
Vlevo obr. II.42 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru, zvětšeno 10000x; vpravo graf II.42 ukazující orientaci vláken



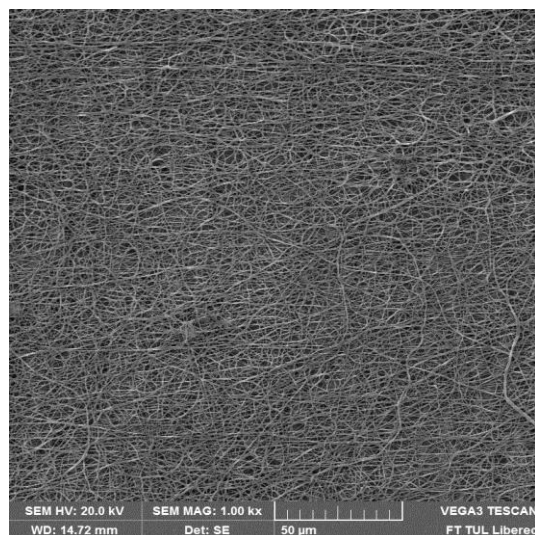
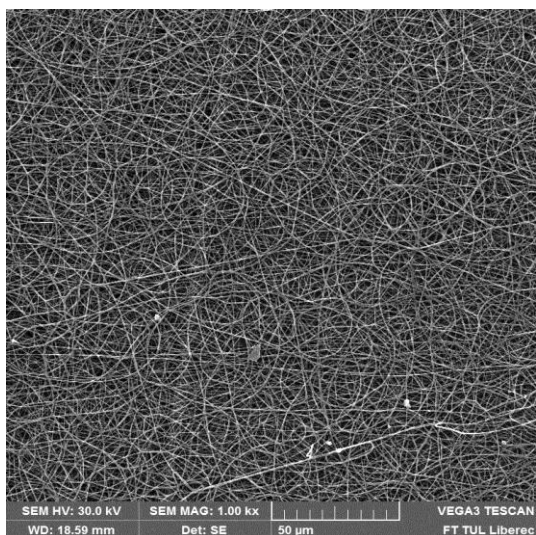
Vlevo obr. III.1 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.2 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; zvětšeno 1000x



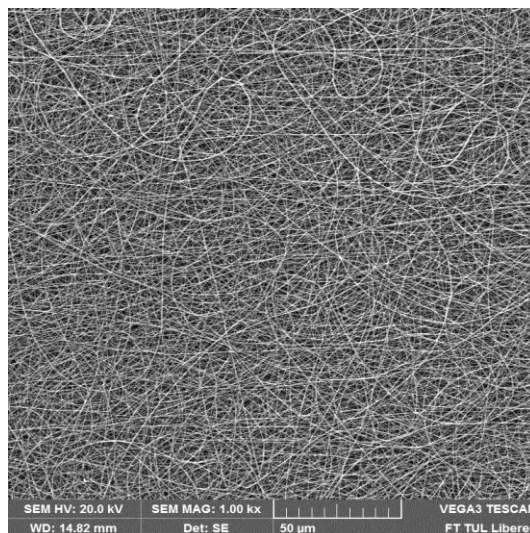
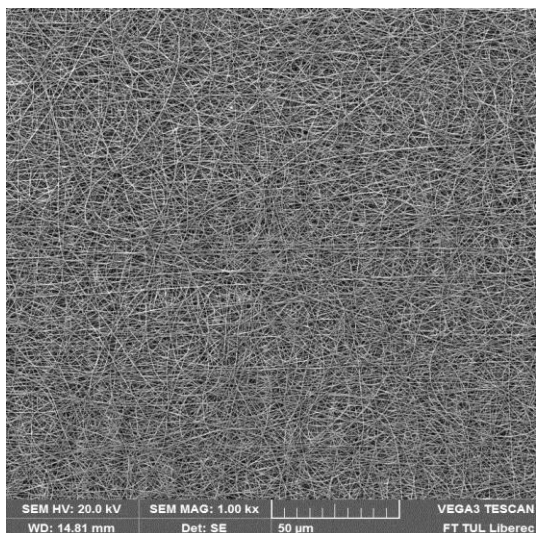
Vlevo obr. III.3 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.4 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; zvětšeno 1000x



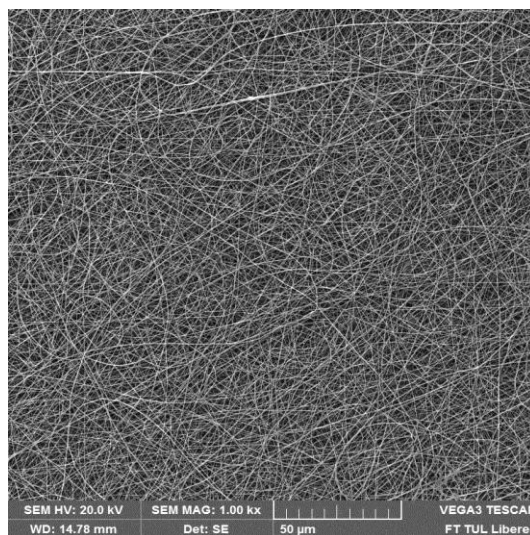
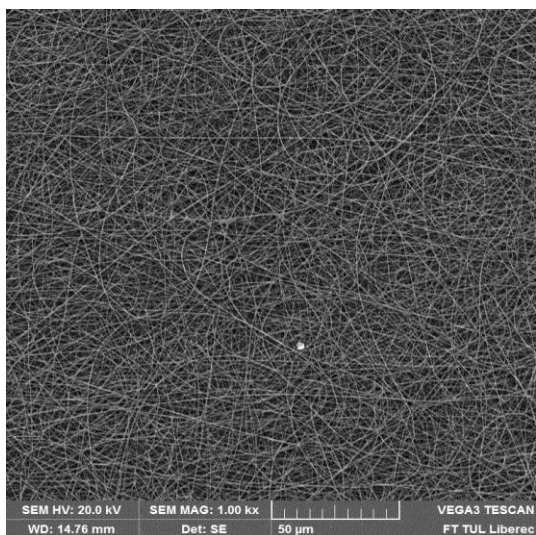
Vlevo obr. III.5 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.6 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; zvětšeno 1000x



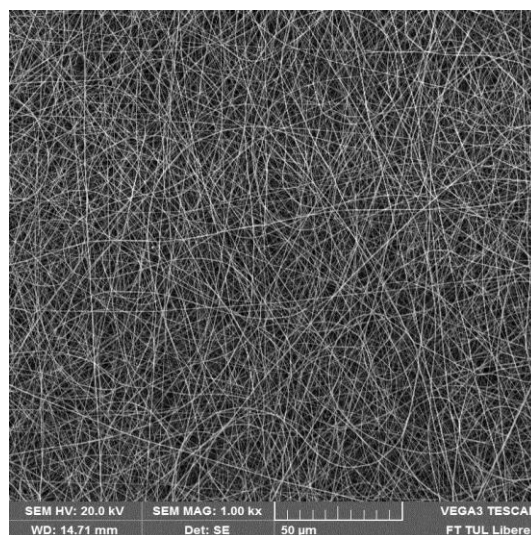
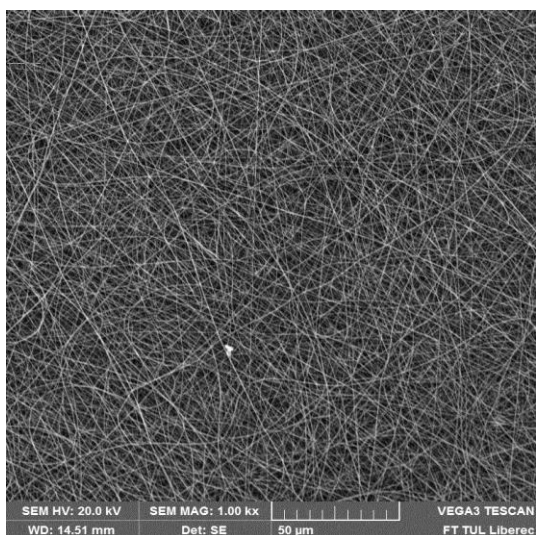
Vlevo obr. III.7 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.8 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



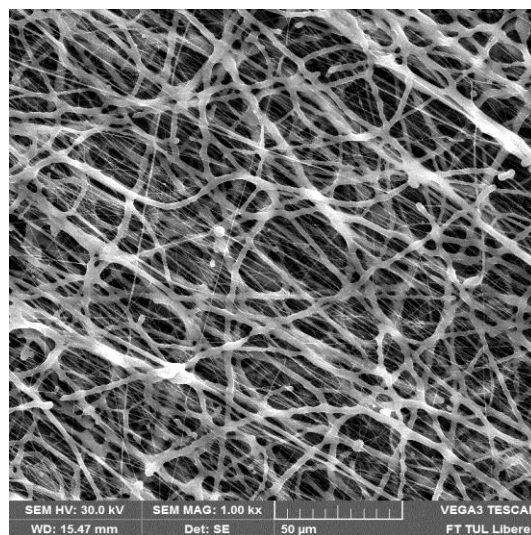
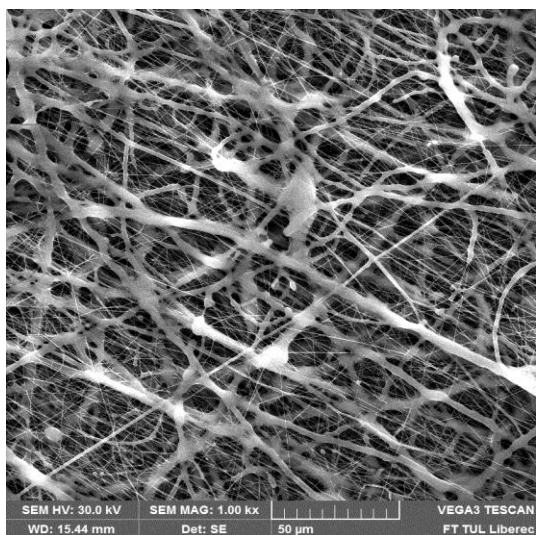
Vlevo obr. III.9 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; vpravo obr. III.10 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



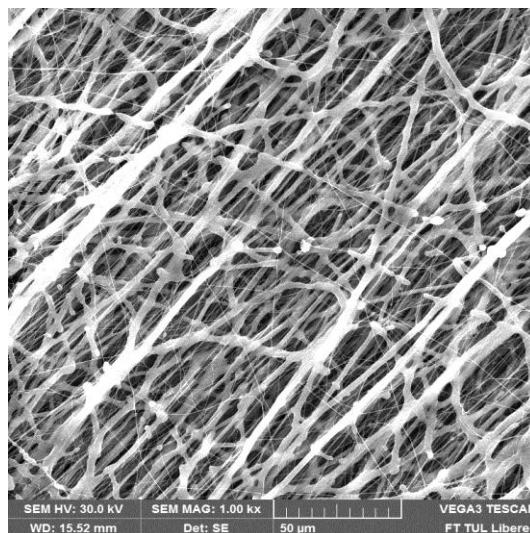
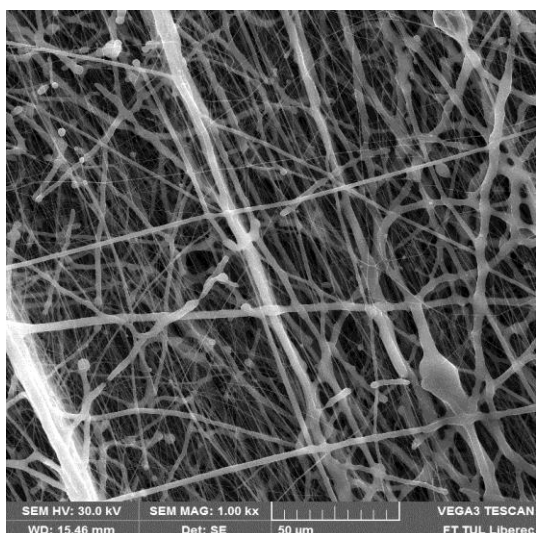
Vlevo obr. III.11 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; vpravo obr. III.12 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



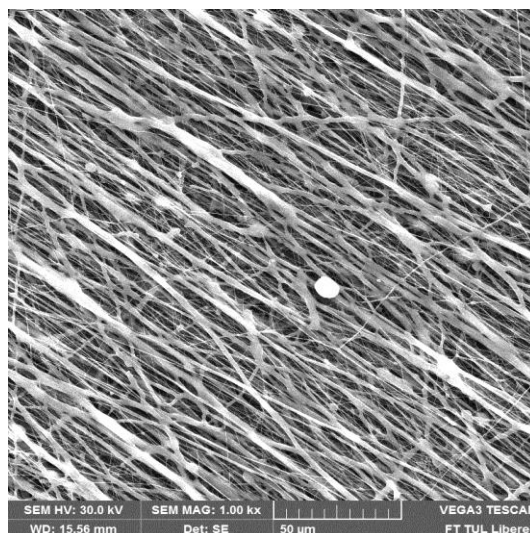
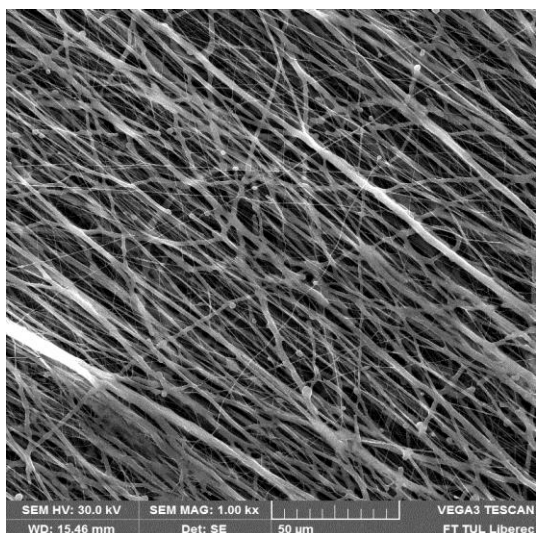
Vlevo obr. III.13 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; vpravo obr. III.14 SEM snímek PVA vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



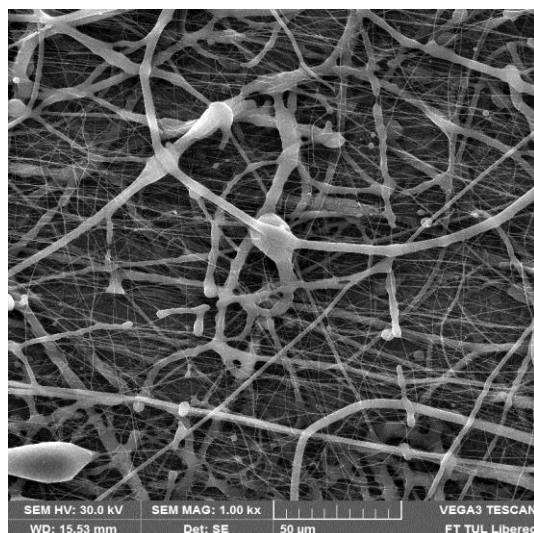
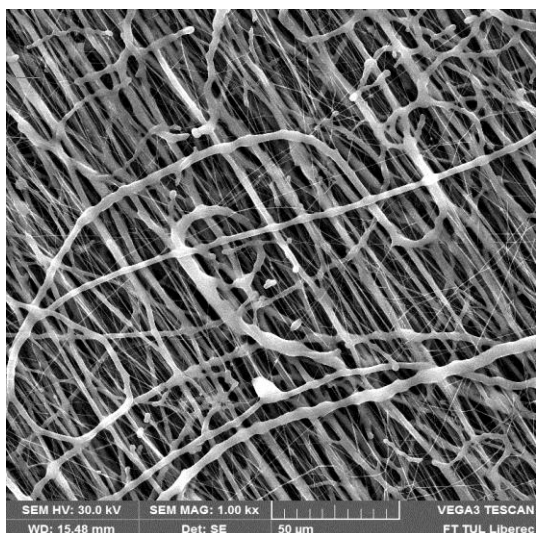
Vlevo obr. III.15 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.16 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; zvětšeno 1000x



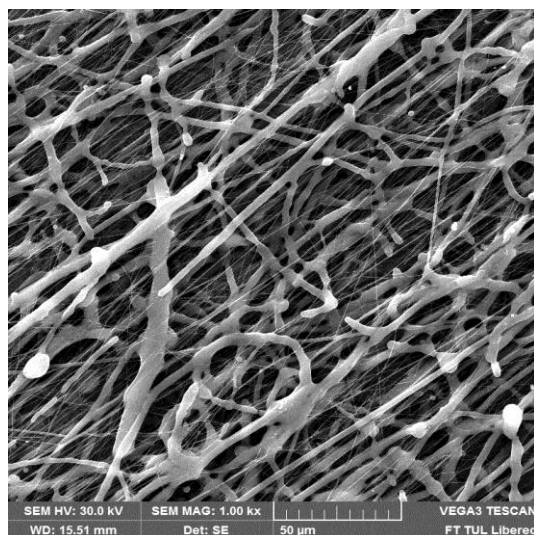
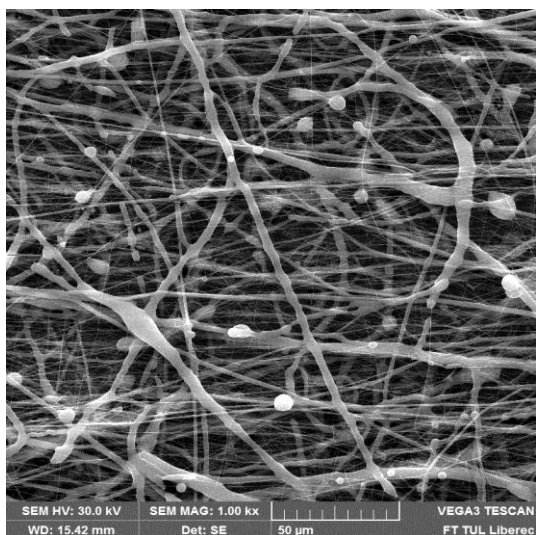
Vlevo obr. III.17 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.18 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; zvětšeno 1000x



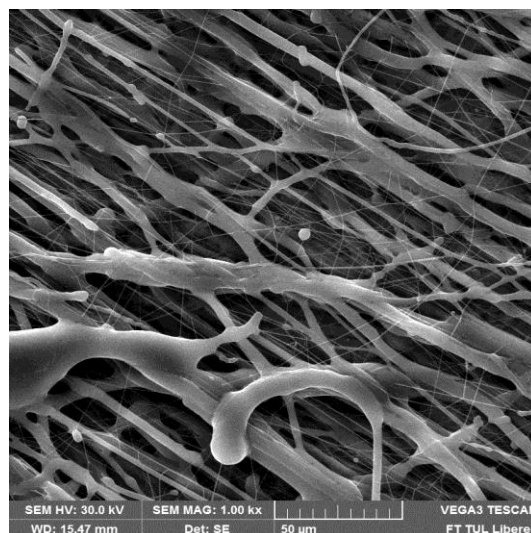
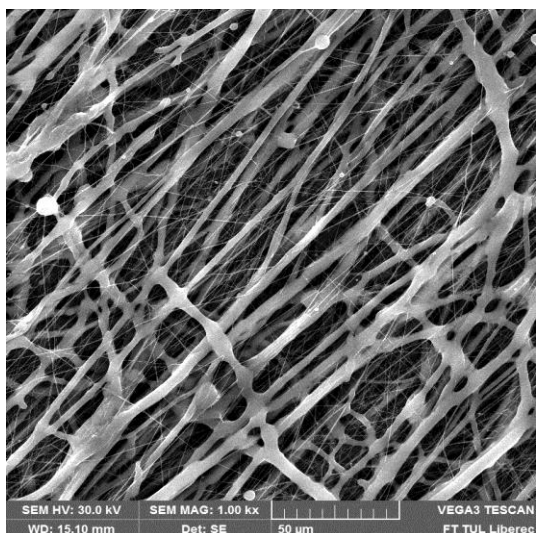
Vlevo obr. III.19 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.20 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; zvětšeno 1000x



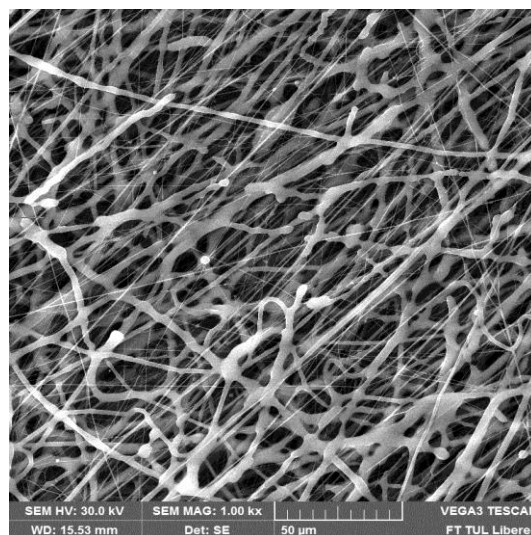
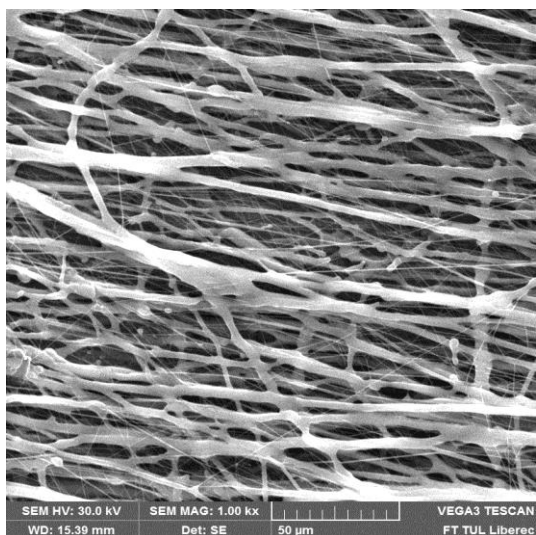
Vlevo obr. III.21 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.22 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



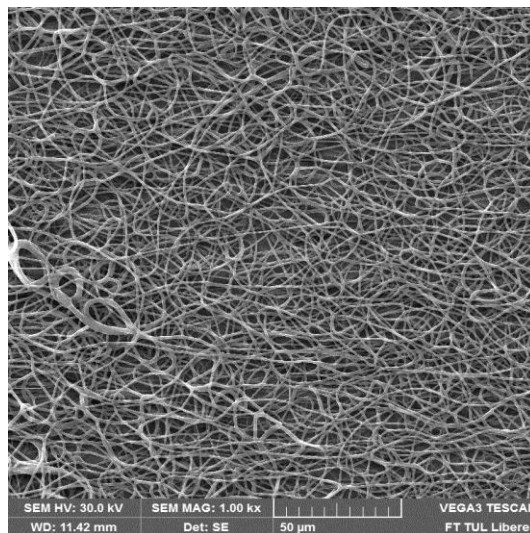
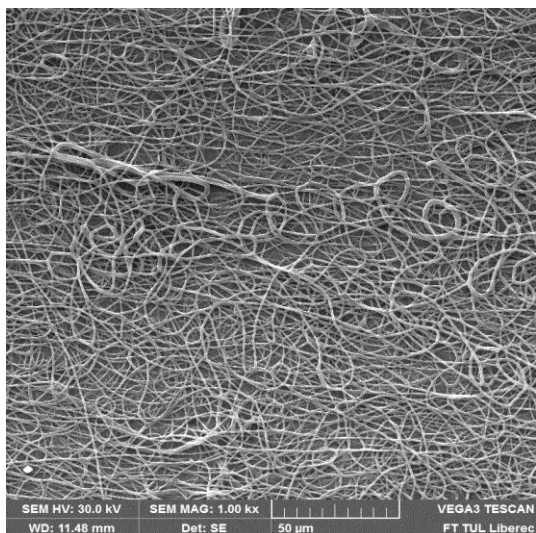
Vlevo obr. III.23 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; vpravo obr. III.24 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



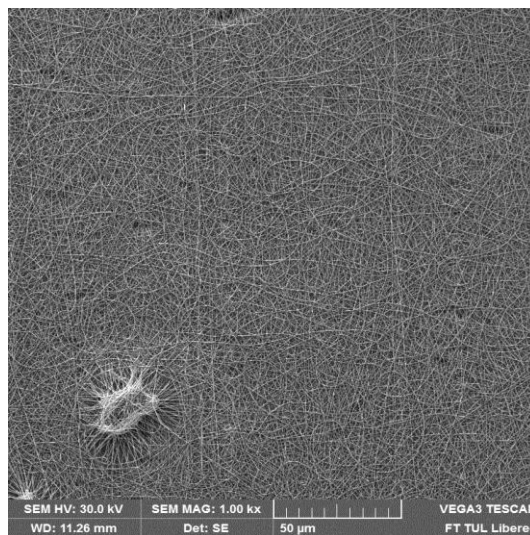
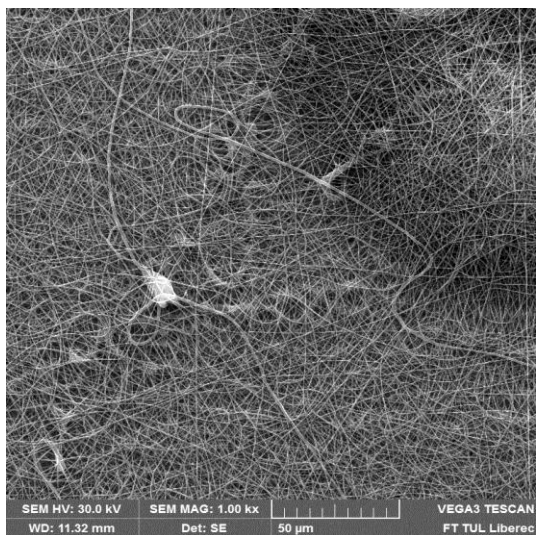
Vlevo obr. III.25 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; vpravo obr. III.26 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



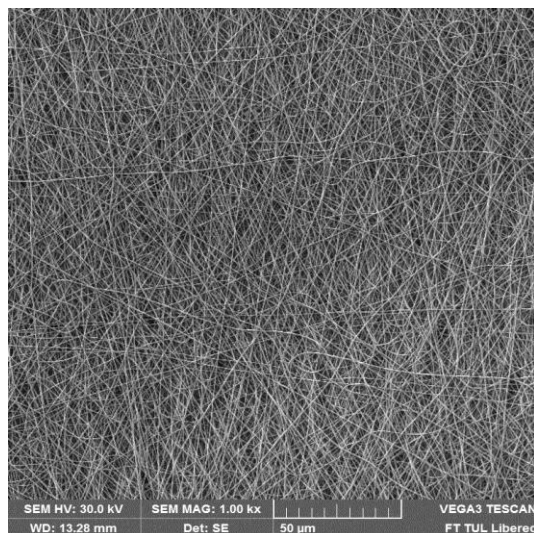
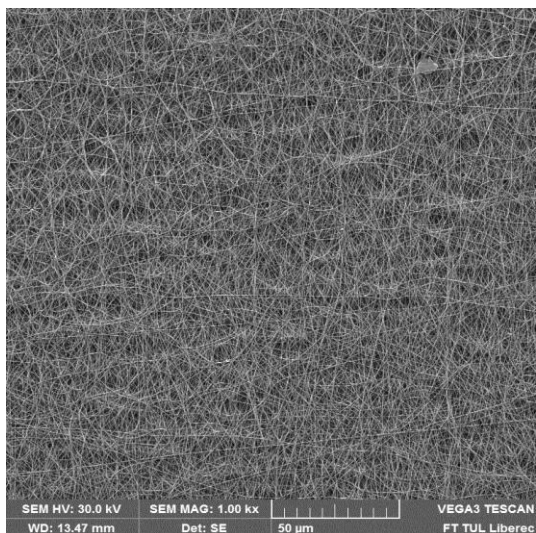
Vlevo obr. III.27 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; vpravo obr. III.28 SEM snímek PCL vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



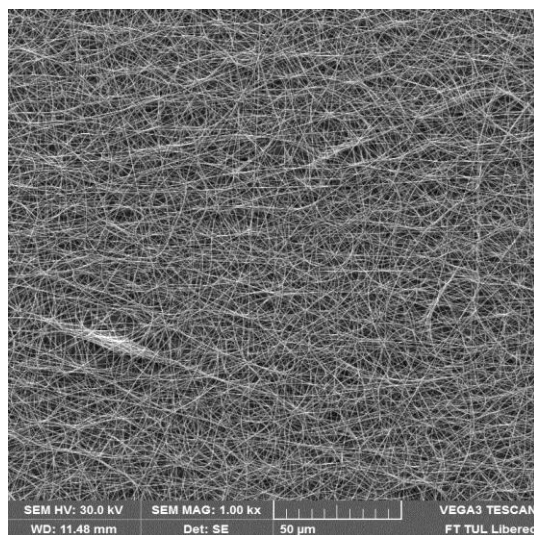
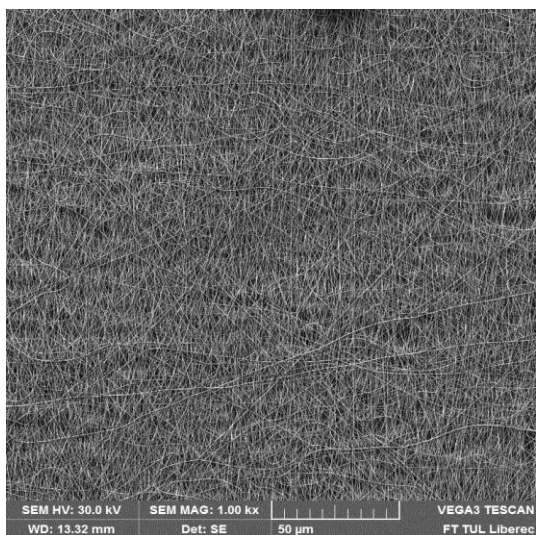
Vlevo obr. III.29 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.30 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; zvětšeno 1000x



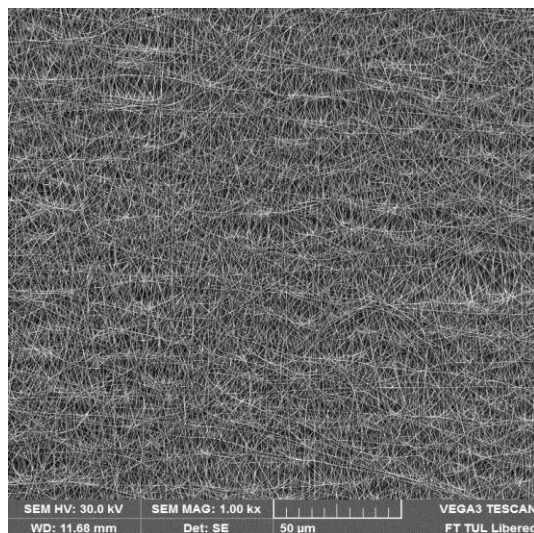
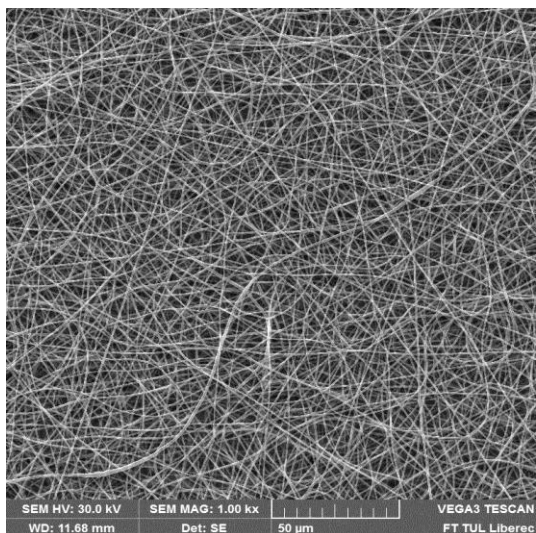
Vlevo obr. III.31 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.32 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; zvětšeno 1000x



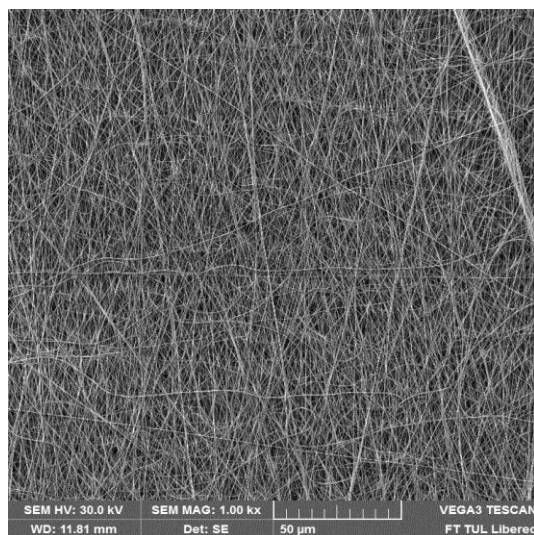
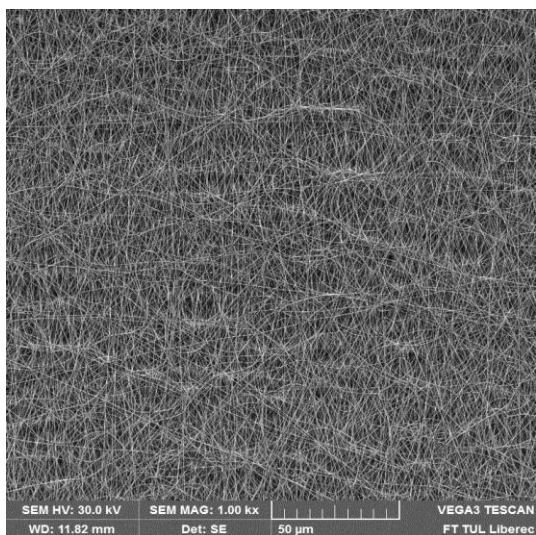
Vlevo obr. III.33 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.34 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; zvětšeno 1000x



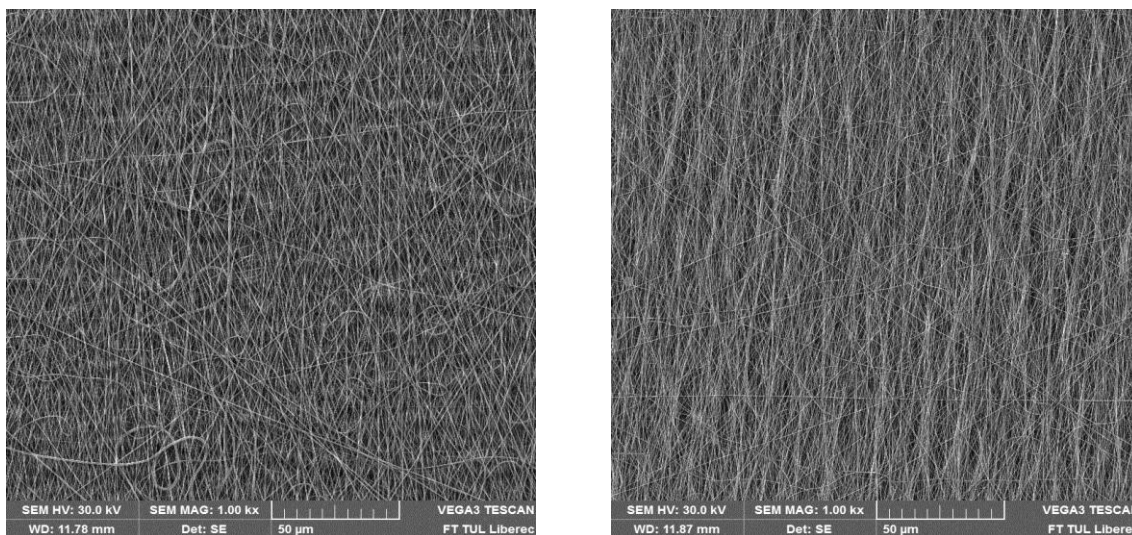
Vlevo obr. III.35 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm; vpravo obr. III.36 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



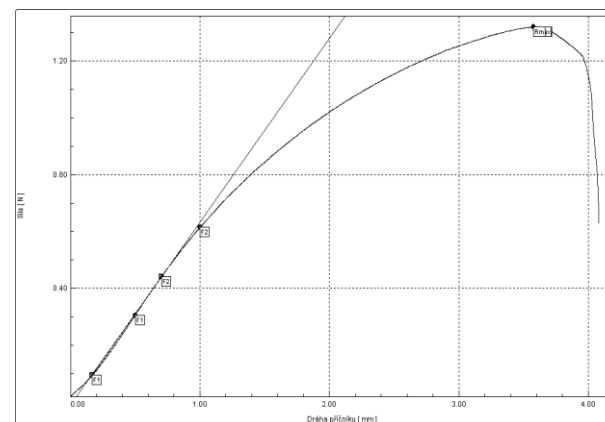
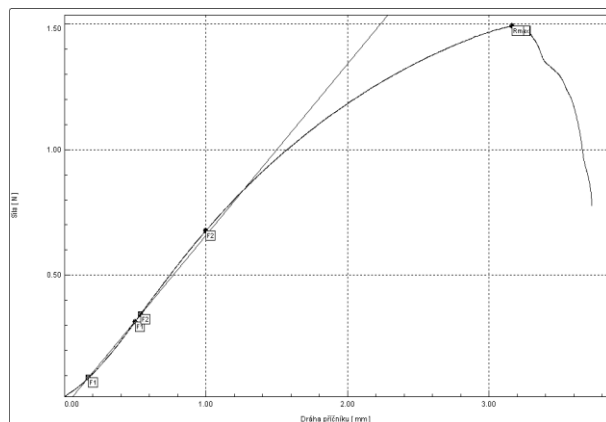
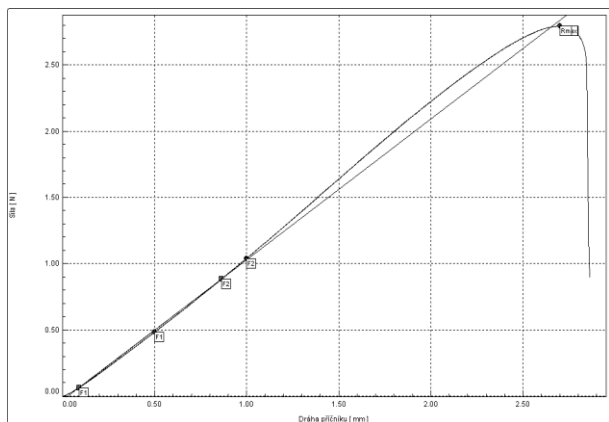
Vlevo obr. III.37 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 5000 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; vpravo obr. III.38 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti 7500 ot.min^{-1} a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



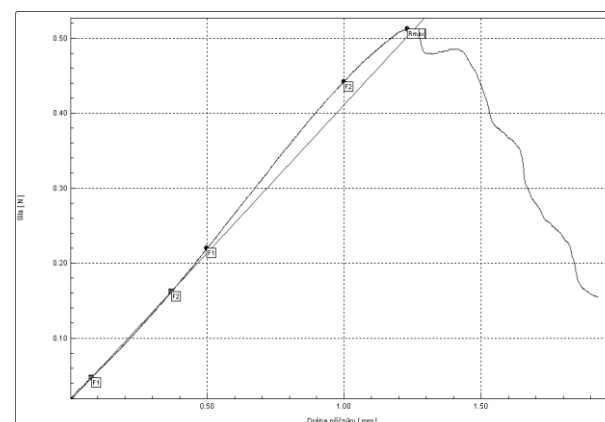
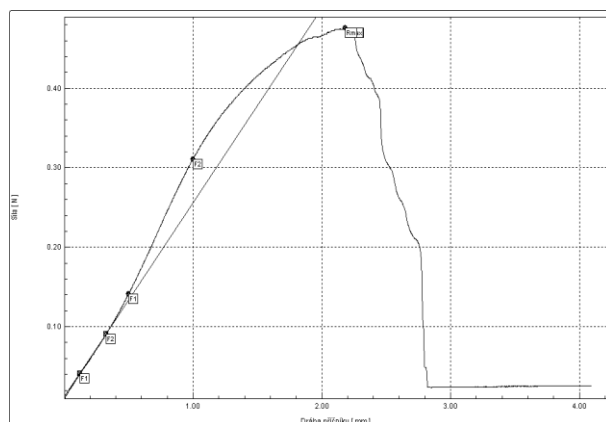
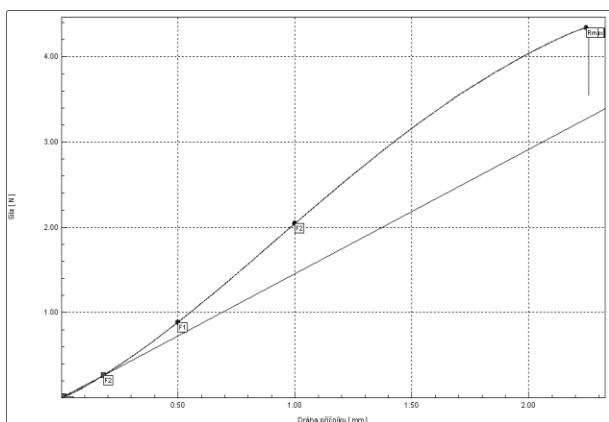
Vlevo obr. III.39 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; vpravo obr. III.40 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $15000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



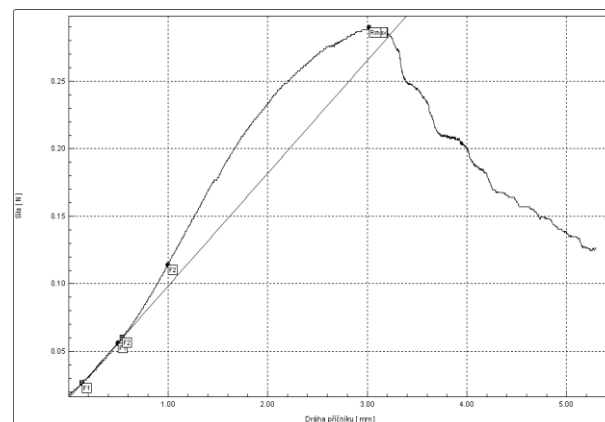
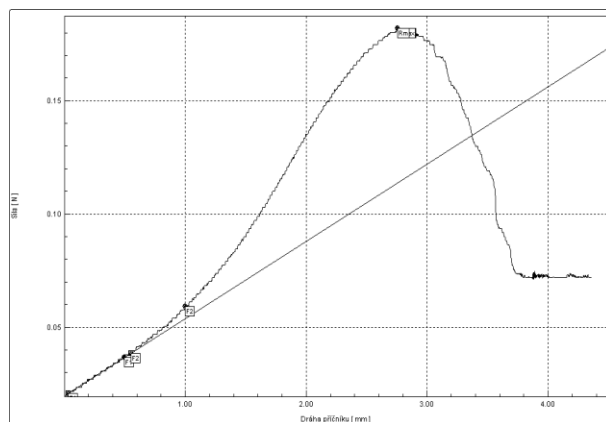
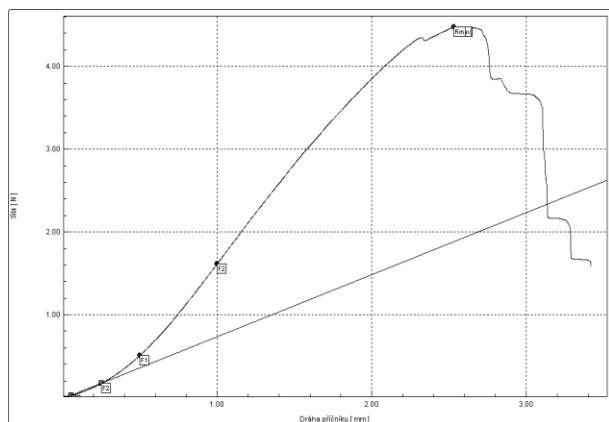
Vlevo obr. III.41 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; vpravo obr. III.42 SEM snímek PUR vrstvy vyrobené při rychlosti $25000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm; zvětšeno 1000x



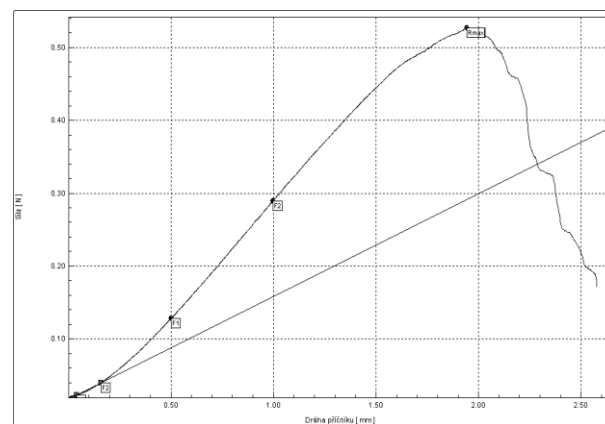
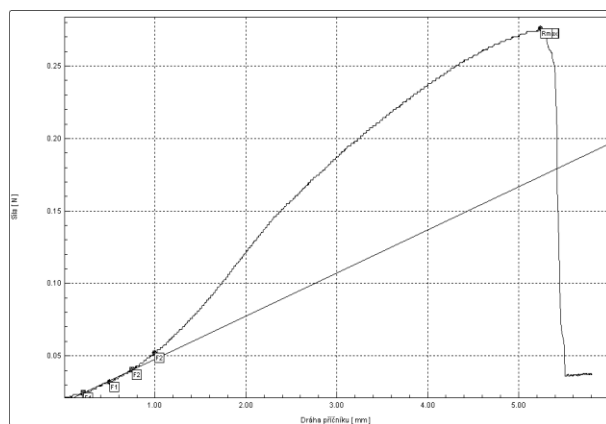
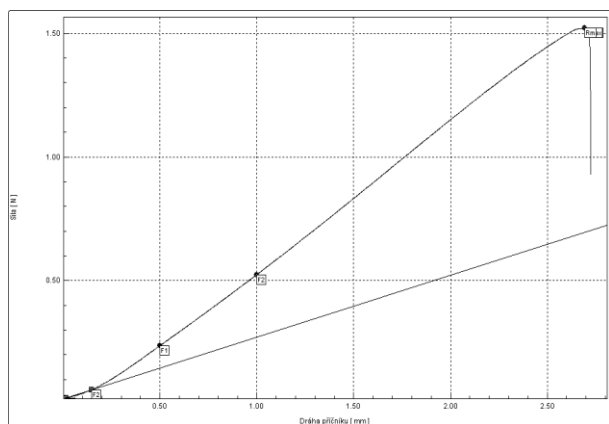
Graf IV.1,2,3 Tahové křivky PCL vzorku vyrobeného při 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



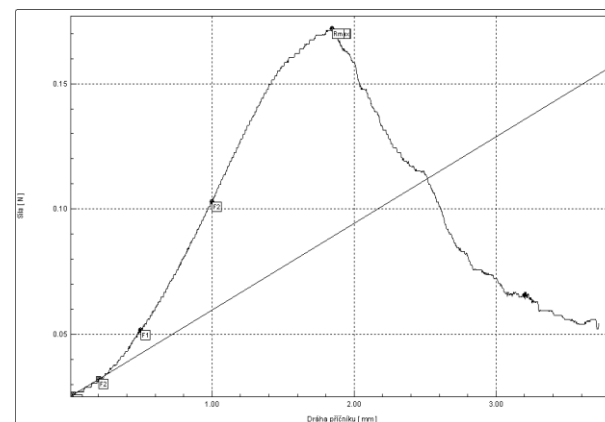
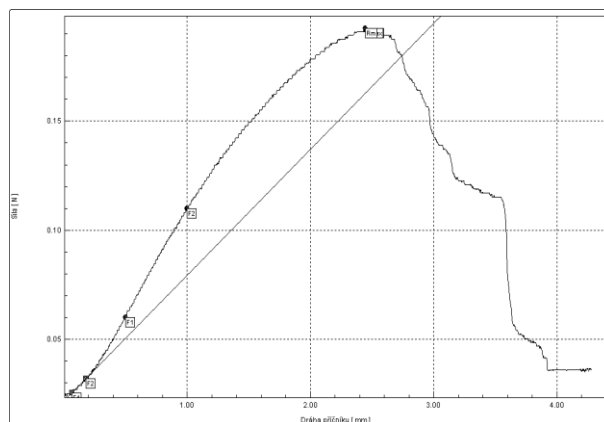
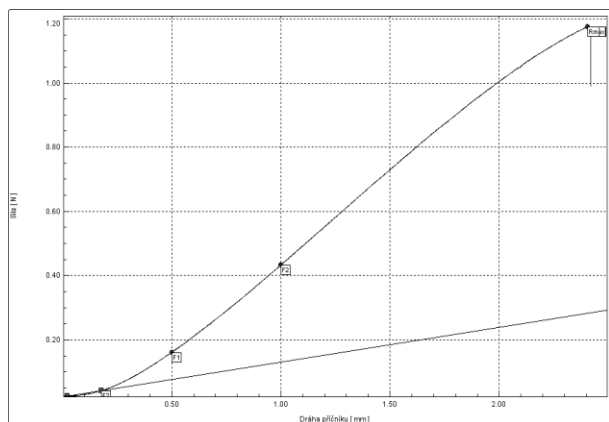
Graf IV.4,5,6 Tahové křivky PCL vzorku vyrobeného při $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



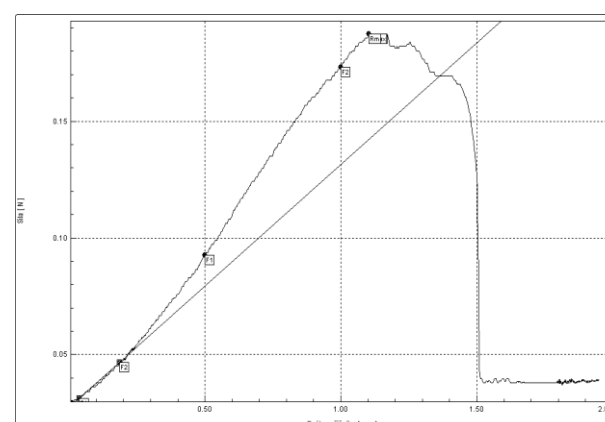
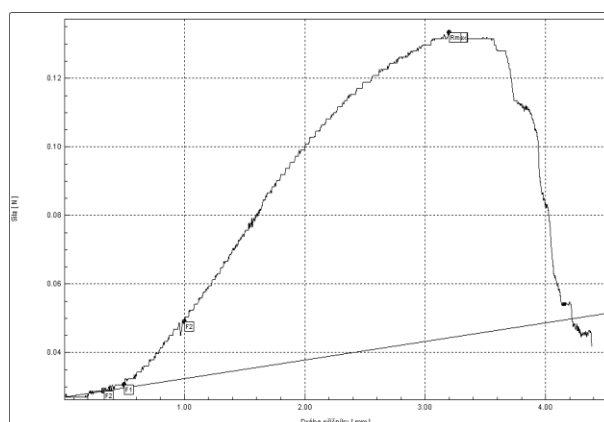
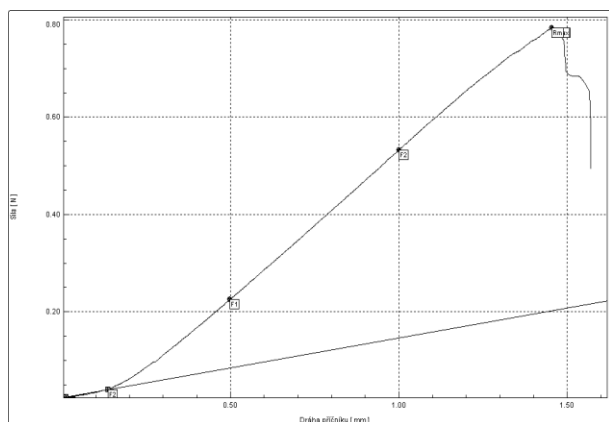
Graf IV.7,8,9 Tahové křivky PCL vzorku vyrobeného při 20000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



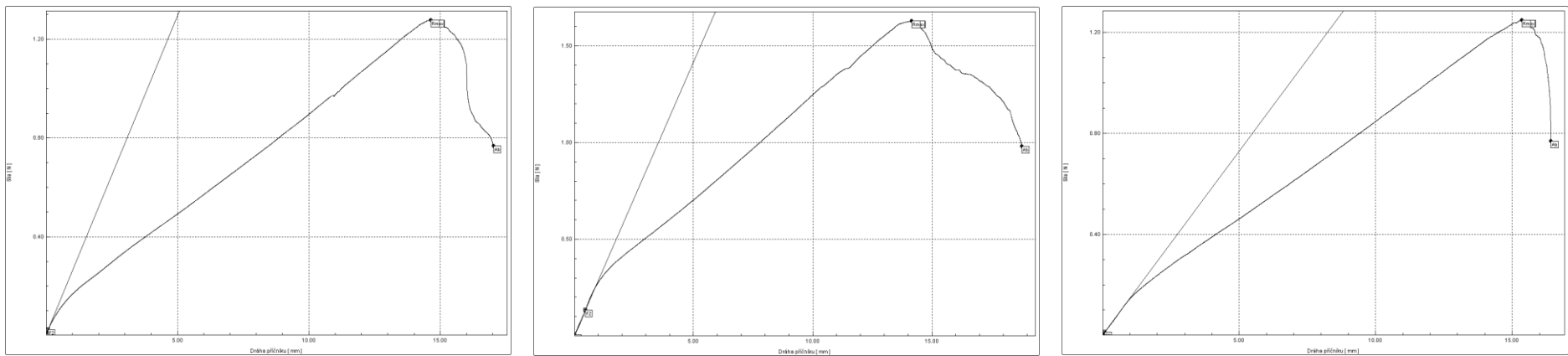
Graf IV.10,11,12 Tahové křivky PCL vzorku vyrobeného při 3000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



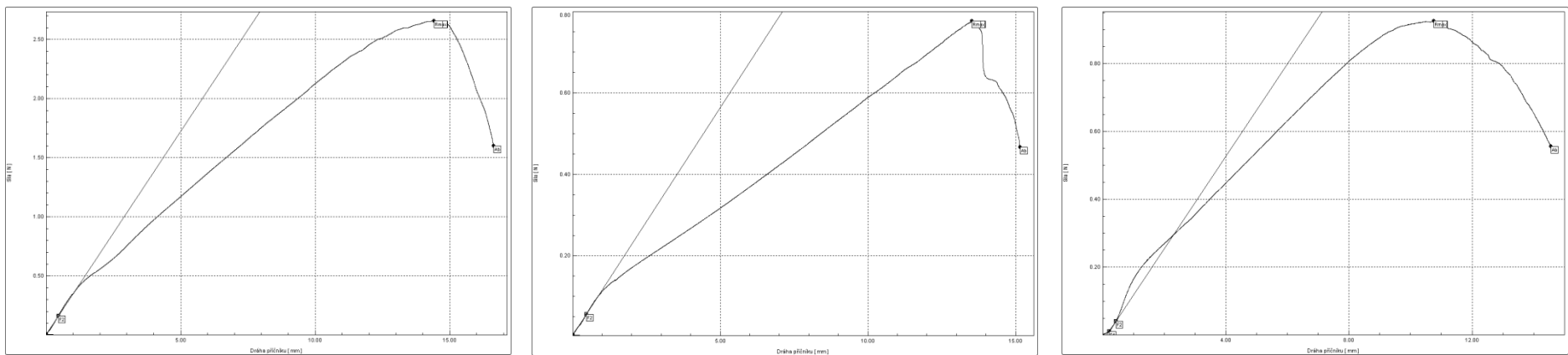
Graf IV.13,14,15 Tahové křivky PCL vzorku vyrobeného při $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



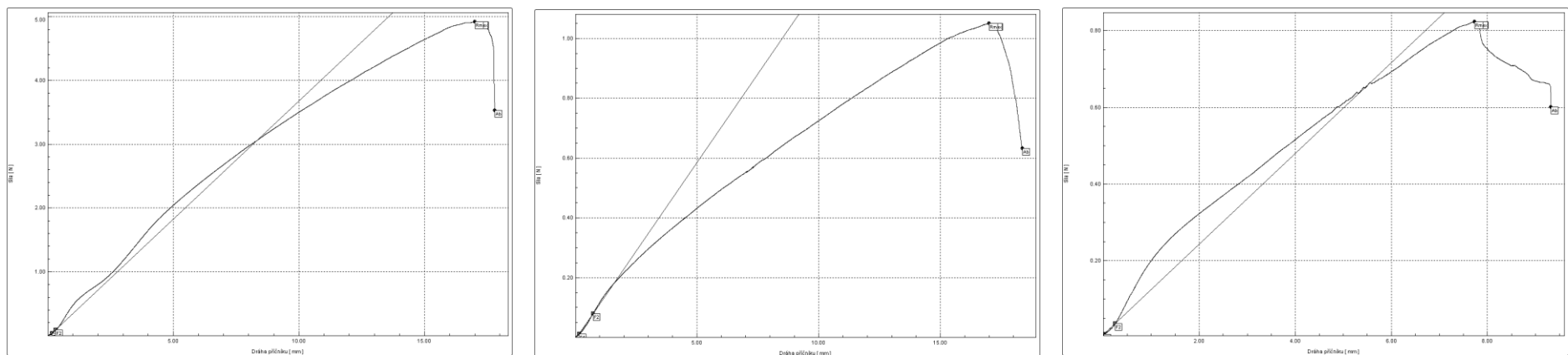
Graf IV.16,17,18 Tahové křivky PCL vzorku vyrobeného při $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



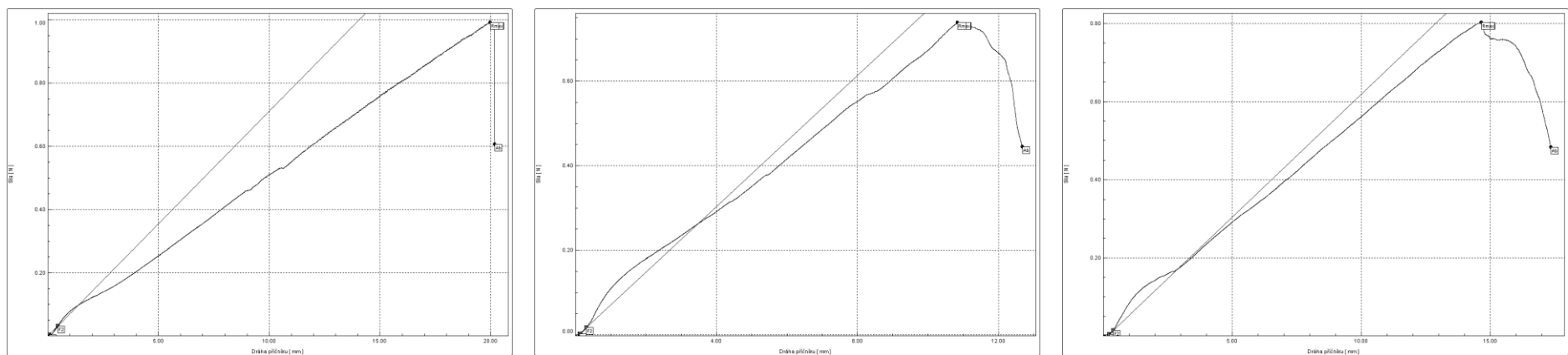
Graf IV.19,20,21 Tahové křivky PUR vzorku vyrobeného při 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



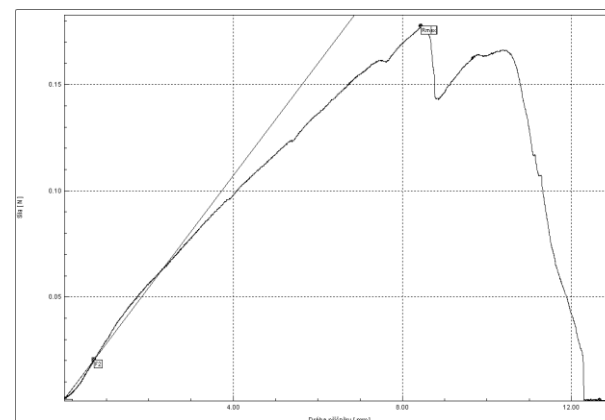
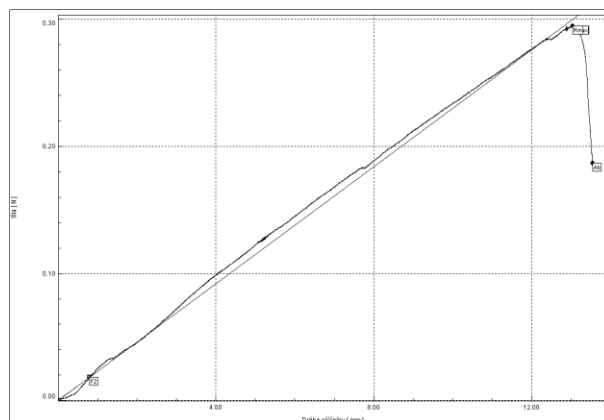
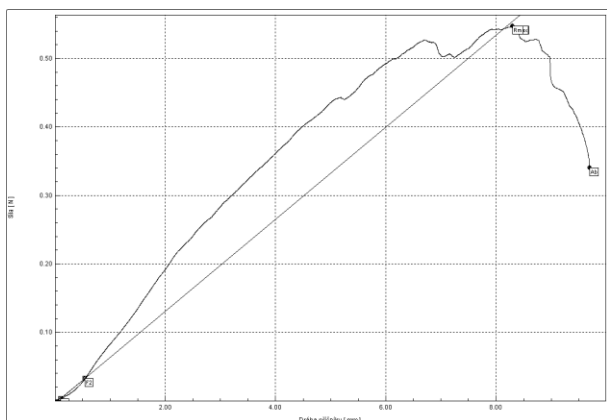
Graf IV.22,23,24 Tahové křivky PUR vzorku vyrobeného při $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



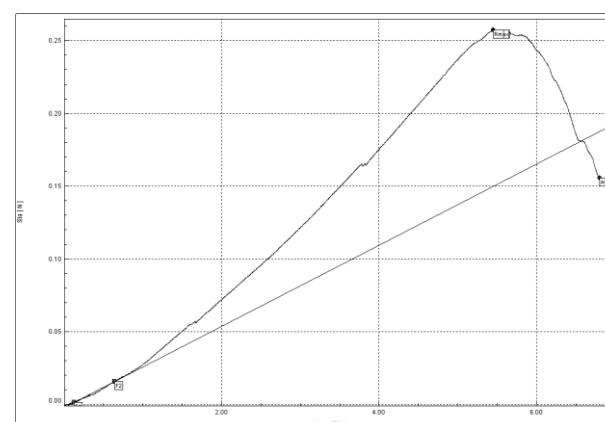
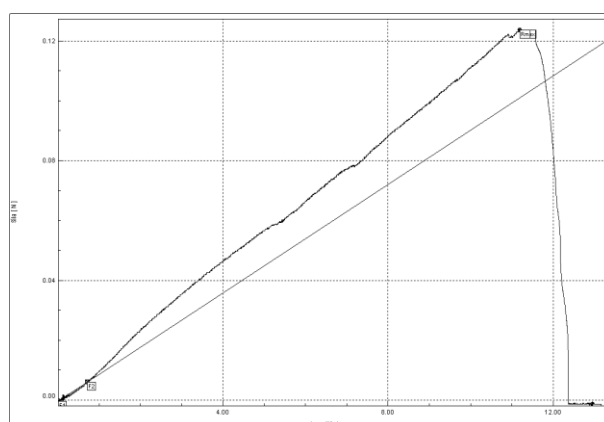
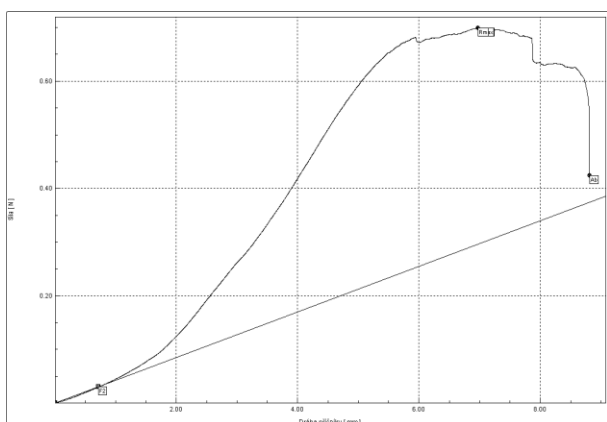
Graf IV.25,26,27 Tahové křivky PUR vzorku vyrobeného při $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 100 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



Graf IV.28,29,30 Tahové křivky PUR vzorku vyrobeného při 3000 ot.min^{-1} a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



Graf IV.31,32,33 Tahové křivky PUR vzorku vyrobeného při $10000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování



Graf IV.34,35,36 Tahové křivky PUR vzorku vyrobeného při $20000 \text{ ot.min}^{-1}$ a vzdálenosti 200 mm jehly od kolektoru; zleva: radiální, axiální a diagonální směr testování

Rychlost otáčení kolektoru 3000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 100 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	27,03	2,81	7,21	2,71	0,72	35,75	1,32	3,38	1,67	0,34	19,84	1,06	2,79	1,34	0,28
2. zkouška	22,63	2,4	6	2,05	0,6	31,62	1,51	3,6	1,64	0,36	19,12	1,36	3,4	1,53	0,34
3. zkouška						31,82	1,44	3,7	1,58	0,37	25,08	1,52	3,8	1,09	0,38
Průměrná hodnota	24,83	2,61	6,61	2,38	0,66	33,06	1,42	3,56	1,63	0,35	21,35	1,31	3,33	1,32	0,33
Směrodatná odch.	3,11	0,29	0,86	0,47	0,08	2,33	0,10	0,16	0,04	0,01	3,25	0,23	0,51	0,22	0,05
Variační koef.	12,53	11,13	12,95	19,61	12,86	7,04	6,75	4,60	2,62	3,92	15,25	17,78	15,27	16,56	15,18

Tab. V.1 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PCL vzorků vyrobených při 3000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm

Rychlost otáčení kolektoru 10000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 100 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	22,17	4,22	13,19	5,21	1,32	21,81	0,47	1,52	0,79	0,15	10,74	0,53	1,71	1,66	0,17
2. zkouška	20,14	4,02	12,18	4,57	1,22	21,59	0,48	1,5	0,71	0,15	12,31	0,53	1,71	1,26	0,17
3. zkouška	22,47	4,32	13,01	4,44	1,31	17,77	0,43	1,3	0,74	0,13	13,49	0,54	1,8	1,34	0,18
Průměrná hodnota	21,59	4,19	12,79	4,74	1,29	20,39	0,46	1,44	0,75	0,14	12,18	0,53	1,74	1,42	0,17
Směrodatná odch.	1,27	0,15	0,54	0,41	0,06	2,27	0,03	0,12	0,04	0,01	1,38	0,01	0,05	0,21	0,01
Variační koef.	5,88	3,65	4,21	8,65	4,45	11,13	5,75	8,45	4,92	6,88	11,33	1,08	2,99	14,78	5,74

Tab. V.2 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PCL vzorků vyrobených při 10000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm

Rychlost otáčení kolektoru 20000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 100 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	26,38	4,51	9,8	0,98	0,98	41,72	0,23	0,51	0,1	0,05	27,44	0,28	0,6	0,1	0,06
2. zkouška	25,31	4,47	9,51	1,59	0,95	27,54	0,18	0,4	0,07	0,04	30,23	0,28	0,61	0,18	0,06
3. zkouška	30,8	5,19	11,3	0,51	1,13	31,53	0,19	0,4	0,09	0,04	25,35	0,23	0,5	0,17	0,05
Průměrná hodnota	27,5	4,72	10,20	1,03	1,02	33,59	0,20	0,44	0,09	0,04	27,67	0,26	0,57	0,15	0,06
Směrodatná odch.	2,91	0,40	0,96	0,54	0,1	7,31	0,03	0,06	0,01	0,01	2,45	0,03	0,06	0,04	0,01
Variační koef.	10,58	8,57	9,42	52,47	9,31	21,76	13,23	14,54	13,97	15,77	8,86	10,96	10,67	28,11	8,78

Tab. V.3 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PCL vzorků vyrobených při 20000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm

Rychlost otáčení kolektoru 3000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 200 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	27,68	1,48	8,22	0,39	0,82	52,42	0,27	1,59	0,17	0,16	19,42	0,53	2,52	0,64	0,25
2. zkouška	26,92	1,51	7,19	1,16	0,72	38,51	0,19	1,1	0,14	0,11	23,38	0,4	2	0,35	0,2
3. zkouška	21,95	1,06	5,3	0,34	0,53										
Průměrná hodnota	25,52	1,35	6,90	0,63	0,69	45,47	0,23	1,35	0,16	0,14	21,40	0,47	2,26	0,50	0,23
Směrodatná odch.	3,11	0,25	1,48	0,46	0,15	9,84	0,06	0,35	0,02	0,04	2,80	0,09	0,37	0,21	0,04
Variační koef.	12,18	18,64	21,45	73,31	21,49	21,63	24,60	25,76	13,69	26,19	13,08	19,77	16,27	41,43	15,71

Tab. V.4 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PCL vzorků vyrobených při 3000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm

Rychlost otáčení kolektoru 10000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 200 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	19,21	0,8	3,81	0,95	0,38	34,37	1,17	0,89	0,14	0,09	19,59	0,22	1	0,14	0,1
2. zkouška	24,07	1,18	5,9	0,56	0,59	24,46	0,19	0,86	0,26	0,09	22,01	0,17	0,89	0,11	0,09
3. zkouška	20,13	1,07	5,1	0,74	0,51						18,48	0,17	0,8	0,15	0,08
Průměrná hodnota	21,14	1,02	4,94	0,75	0,49	29,42	0,68	0,88	0,20	0,09	20,02	0,19	0,90	0,13	0,09
Směrodatná odch.	2,58	0,20	1,05	0,19	0,1	7,01	0,69	0,02	0,08	0,00	1,8	0,03	0,10	0,02	0,01
Variační koef.	12,19	19,23	21,36	25,65	20,91	23,82	101,91	2,42	42,43	0,00	9,01	15,46	11,17	15,48	8,79

Tab. V.5 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PCL vzorků vyrobených při 10000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm

Rychlost otáčení kolektoru 20000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 200 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	16,97	0,9	6,43	1,06	0,64	33	0,14	0,93	0,07	0,09	11,03	0,17	1,21	0,68	0,12
2. zkouška	14,55	0,78	5,57	0,89	0,56	31,98	0,14	1	0,06	0,1	17,49	0,11	0,78	0,02	0,08
3. zkouška						27,11	0,09	0,69	0,04	0,07	18,45	0,15	1	0,1	0,1
Průměrná hodnota	15,76	0,84	6,00	0,98	0,6	30,69	0,12	0,87	0,06	0,09	15,66	0,14	1,00	0,26	0,1
Směrodatná odch.	1,71	0,08	0,61	0,12	0,06	3,15	0,03	0,16	0,02	0,01	4,03	0,03	0,22	0,36	0,02
Variační koef.	10,86	10,10	10,14	12,33	9,43	10,25	23,41	18,62	30	12,97	25,76	21,31	21,57	135,79	20

Tab. V.6 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PCL vzorků vyrobených při 20000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm

Rychlost otáčení kolektoru 3000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 100 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	122,33	1,14	19	2,12	2,11	141,48	1,63	23,29	4,57	2,58	170,82	1,71	24,42	5,24	2,44
2. zkouška	136,53	1,21	20,16	6,73	2,24	174,22	2,36	39,33	6,57	3,93	199,95	1,83	30,5	3,34	3,39
3. zkouška	146,46	1,28	21,33	4,76	2,36	199,92	2,1	35	5,21	3,89	153,6	1,25	17,86	1,99	1,78
Průměrná hodnota	135,11	1,21	20,16	4,54	2,24	171,87	2,03	32,54	5,45	3,47	174,79	1,6	24,26	3,52	2,54
Směrodatná odch.	12,13	0,07	1,17	2,31	0,13	29,29	0,37	8,30	1,02	0,76	23,43	0,31	6,32	1,63	0,81
Variační koef.	8,98	5,79	5,78	51,01	5,79	17,04	18,18	25,50	18,75	22,03	13,4	19,26	26,06	46,4	31,84

Tab. V.7 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PUR vzorků vyrobených při 3000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm

Rychlost otáčení kolektoru 10000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 100 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	174,22	1,73	28,83	3,98	3,21	140,41	0,63	12,6	2,07	1,26	107,58	0,93	18,6	2,74	1,85
2. zkouška	167,51	2,88	48	2,68	4,81	104,01	0,87	14,5	2,93	1,45	116,5	0,83	16,6	3,38	1,66
3. zkouška	144,2	2,66	44,33	5,84	4,43	135,16	0,78	15,6	2,41	1,73					
Průměrná hodnota	161,98	2,42	40,39	4,17	4,15	126,53	0,76	14,23	2,47	1,48	112,04	0,88	17,60	3,06	1,75
Směrodatná odch.	15,76	0,61	10,18	1,59	0,84	19,68	0,12	1,52	0,44	0,23	6,3	0,07	1,41	0,45	0,14
Variační koef.	9,73	25,19	25,19	38,05	20,17	15,55	16,06	10,66	17,69	15,84	5,63	7,87	8,04	14,8	7,87

Tab. V.8 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PUR vzorků vyrobených při 10000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm

Rychlost otáčení kolektoru 20000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 100 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	158,46	4,71	67,29	8,8	7,86	169,88	1,05	17,5	1,97	1,75	162,77	1,05	21	2,24	2,34
2. zkouška	170,1	4,92	92	5,56	8,2	162,32	1,13	18,83	1,78	1,88	129,81	1,13	18,83	1,11	2,09
3. zkouška						165,87	0,89	12,71	1,78	1,27	77,31	0,82	10,25	2,58	1,72
Průměrná hodnota	164,28	4,82	79,65	7,18	8,03	166,02	1,02	16,35	1,84	1,63	123,3	1	16,69	2,24	2,05
Směrodatná odch.	8,23	0,14	17,47	2,29	0,24	3,78	0,12	3,22	0,11	0,32	43,1	0,16	5,68	1,11	0,31
Variační koef.	5,01	2,99	21,94	31,89	2,99	2,28	12,03	19,69	6,03	19,77	34,96	15,94	34,05	2,58	15,28

Tab. V.9 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PUR vzorků vyrobených při 20000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 100 mm

Rychlost otáčení kolektoru 3000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 200 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	120,05	0,62	20,67	3,41	2,05	125,47	0,87	29	5,34	2,91	168,33	0,79	26,33	2,45	2,93
2. zkouška	199,75	0,99	33,00	2,79	3,31	108,43	0,74	24,67	2,69	2,74	185,25	0,83	27,67	0,31	3,08
3. zkouška											146,53	0,80	26,67	2,45	3,34
Průměrná hodnota	159,90	0,80	26,84	3,10	2,68	116,95	0,81	26,835	4,02	2,83	166,70	0,81	26,89	1,74	3,12
Směrodatná odch.	56,36	0,27	8,72	0,44	0,89	12,05	0,09	3,06	1,87	0,75	19,41	0,02	0,70	1,23	0,21
Variační koef.	35,25	33,06	32,49	14,11	33,06	10,30	30,68	11,41	46,67	31,50	11,64	2,51	2,59	70,93	6,70

Tab. V.10 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PUR vzorků vyrobených při 3000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm

Rychlost otáčení kolektoru 10000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 200 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	71,81	0,33	16,50	4,70	1,67	96,27	0,22	11	0,24	0,74	126,76	0,25	8,33	0,58	1,20
2. zkouška	89,07	0,60	30	5,29	3,00	56,34	0,13	4,33	0,42	0,42	84,40	0,18	6	1,03	0,99
3. zkouška	96,95	0,55	27,50	3,21	2,74						113,18	0,31	10,33	0,68	1,48
Průměrná hodnota	85,94	0,49	24,67	4,40	2,47	76,31	0,18	7,67	0,33	0,58	108,11	0,25	8,22	0,77	1,22
Směrodatná odch.	12,86	0,14	7,18	1,07	0,70	28,23	0,06	4,72	0,13	0,23	21,63	0,07	2,17	0,24	0,25
Variační koef.	14,96	29,12	29,12	24,36	28,54	37,00	36,37	61,53	38,57	39,01	20,01	26,95	26,36	30,78	20,13

Tab. V.11 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PUR vzorků vyrobených při 10000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm

Rychlost otáčení kolektoru 20000 ot.min ⁻¹ - Vzdálenost kolektoru 200 mm															
	Radiální					Axiální					Diagonální				
	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	A max [%]	F max [N]	F max [N.mm ⁻¹]	E [Mpa]	Rm [Mpa]
1. zkouška	69,75	0,70	23,33	1,08	2,59	58,74	0,09	3	0,83	0,43	52,57	0,16	8	0,32	0,88
2. zkouška	39,01	0,72	36	6,05	3,61	111,98	0,12	4	0,47	0,62	54,51	0,26	8,67	1,15	1,43
3. zkouška	66,13	0,72	36	0,98	3,60	73,95	0,07	2,33	0,23	0,36	61,55	0,15	5	0,68	1,04
Průměrná hodnota	58,30	0,71	31,78	2,70	3,27	81,56	0,09	3,11	0,51	0,47	56,21	0,19	7,22	0,71	1,12
Směrodatná odch.	16,81	0,01	7,32	2,90	0,59	27,42	0,03	0,84	0,30	0,13	4,72	0,06	1,95	0,42	0,28
Variační koef.	28,83	1,41	23,02	107,38	17,99	33,63	33,33	27,02	58,89	28,69	8,4	32,67	27,06	59,50	25,43

Tab. V.12 Naměřené hodnoty tahových zkoušek PUR vzorků vyrobených při 20000 ot.min⁻¹ a vzdálenosti jehly od kolektoru 200 mm